Die Kühlung der Braunkohlenbriketts

Ein Beitrag zur Frage der maschinellen Verladung von Salonbriketts

Von der Technischen Hochschule zu Breslau zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Berging. Herbert Schuster aus Greiz, Thür.

Referent: Prof. Dr.-Ing. W. Groß
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Spackeler

Tag der mündlichen Prüfung: 22. 12. 1928

Halle (Saale) 1929

Verlag von Wilhelm Knapp

Die Kühlung der Braunkohlenbriketts

Ein Beitrag zur Frage der maschinellen Verladung von Salonbriketts

Von der Technischen Hochschule zu Breslau zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

Vorgelegt von
Dipl.-Berging. Herbert Schuster aus Greiz, Thür.

Referent: Prof. Dr.-Ing. W. Groß
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Spackeler

Tag der mündlichen Prüfung: 22. 12. 1928

Halle (Saale) 1929

Verlag von Wilhelm Knapp

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Einteilung.

Seite

I. Einleitung 5

II. Die physikalischen und rechnerischen Grundlagen der Abkühlung an Briketts
1. Die physikalischen Begriffe 9
2. Die rechnerischen Grundlagen 11

III. Die Faktoren der abklingenden Temperaturverteilung am 7" Salonbrikett
1. Das Raumgewicht 31
2. Die Höhe der Briketts 32
3. Die spezifische Wärme 33
4. Die Wärmeleitfähigkeit 38
5. Die Überschußtemperatur 44
6. Die Wärmeübergangszahl 68

IV. Der Einfluß der Schnellkühlung auf die Brikettqualität 90

V. Vorschläge und Zusammenfassung 94

Bei der Ausführung der Versuche genoß der Verfasser das Entgegenkommen der Generaldirektion der Eintracht-A.G., im besonderen der Verwaltung der Grube Werminghoff, ferner der Direktion der Grube Caroline zu Offleben. Ihnen, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Groß zu Breslau für seine mannigfachen Anregungen, gebührt besonderer Dank. Auch möchte der Verfasser an dieser Stelle dem Deutschen Braunkohlen-Industrie-Verein für die Anerkennung danken, die diese Arbeit als ein Teil des Preisausschreibens über eine Brikettverlademaschine gefunden hat.

I. Einleitung.

In der deutschen Braunkohlenindustrie hat man in den letzten Jahren der Kühlung der Briketts auf dem Wege zur Verladung. und auch während der Verladung besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Die Entfernung eines möglichst großen Teiles der Wärme, die das Brikett beim Austritt aus der Presse hat, ist aus zwei Gründen notwendig:

Zur Vermeidung einer Selbstentzündung im Waggon oder im Stapel,

Zur Erhaltung der Güte der hergestellten Briketts.

Hinsichtlich der Selbstentzündlichkeit ist das Braunkohlenbrikett weniger gefährlich als andere Kohlenarten. Bei der Aufbereitung, der die Braunkohle in der Brikettfabrik unterworfen wird, findet eine Voroxydation statt, die ihre Selbstentzündlichkeit herabsetzt.[1]) Ferner gibt die glatte und im Verhältnis zur Stückgröße kleine Oberfläche des Briketts wenig Gelegenheit zu Absorptions- und Oxydationsvorgängen. Eine Bildung von Grusnestern innerhalb der Stapel, die einen begünstigenden Einfluß auf die Selbsterwärmung ausübt, ist an Briketts normaler Festigkeit wenig zu befürchten. Vielfach wird die Verladung im feuchten Zustand, z. B. bei Regenwetter, als Mitursache der Selbsterwärmung angesehen, doch wird sie meist dadurch vermieden, daß die Brikettrinnen mit Regenhauben versehen, und die Verlade- und Abstellgleise überdacht sind. Daher ist das Braunkohlenbrikett mit einer den durchschnittlichen Lufttemperaturen entsprechenden Eigenwärme als nicht selbstentzündlich anzusehen, wie auch die Versuche des Materialprüfungsamtes zu Großlichterfelde-West ergeben haben.[2])

Die eintretenden Fälle der Selbstentzündung von Brikettladungen, die besonders bei Schiffsversand von schweren Folgen begleitet sein können, haben ihre unmittelbare Ursache in einer Verladung mit zu hohem Wärmegrad. Die Selbstentzündlichkeit aller Kohlen, zwar noch abhängig von der chemischen Natur der betreffenden Kohlesubstanz, nimmt mit steigender

---

[1]) Mildner, Braunkohlenarchiv 1927, Heft 15, bes. S. 25—36. Vgl. auch von Walther-Bielenberg, Braunkohle 1927, S. 825, 853, und Bielenberg, Braunkohle 1928, S. 453 ff.

[2]) Braunkohle 1911, S. 330, 401.

Temperatur stark zu. So wird bei gewissen Brikettarten eine anfängliche Eigenwärme von 30 bis 35 ° als genügend zu der Einleitung von Oxydationsvorgängen angesehen, die bei einer zunehmenden Reaktionsgeschwindigkeit bis zur Selbstentzündung führen können, wenn die Wärme nicht abgeführt wird.

Die Wärmemengen, die bei der physikalischen und chemischen Bindung von Sauerstoff durch das Brikett entstehen, sind an sich sehr klein, und es genügt schon eine geringe Luftzirkulation, um sie abzuführen, und überdies noch eine allmähliche Abkühlung der Brikettladung zu erzielen. Dies wird in den meisten Fällen durch Schüttung der Briketts in den Waggon oder bei Stapelung durch Aussparung von Kühlschächten, meist jedoch schon durch Wechsel in der Verpacklage erreicht, wobei die Luft an den gewölbten Flächen der „Lagen" horizontal entlang und an denen der „Stempel" vertikal aufwärts streichen kann. Die Temperaturgrenzen, mit denen das Brikett zur Verladung kommt, und die entsprechend der Beschaffenheit der Kohlenarten verschieden hoch sein können, sind den Betriebsleitungen der Werke durch Erfahrungen bekannt und werden nur bei ungünstigen Umständen erreicht. Auch kann bei Verladung an heißen Tagen durch besondere Stapelung mit vermehrter Luftzirkulation der Gefahr der Selbsterwärmung vorgebeugt werden, sodaß Brände von Brikettladungen im allgemeinen recht selten sind.

Zweitens ist aus Qualitätsgründen eine gute Kühlung der Briketts vor dem Versand anzustreben. Briketts, die ungenügend gekühlt verladen werden, oder deren weitere Abkühlung im Waggon durch Fehlen von Luftzirkulation behindert wird, werden mürbe und unansehnlich, und ihre Bruchfestigkeit nimmt ab. Von fachmännischer Seite [3]) wird dies einerseits einer latenten Verbrennung zugeschoben, andererseits einem Wasserverlust durch Nachverdampfung, verbunden mit einer Gefügelockerung der Brikettmasse. Die letztere erscheint dem Verfasser als hauptsächlich. Der Dunstdruck des in der Brikettmasse enthaltenen Wassers ist bei höherer Temperatur entsprechend größer. Je schneller der Stein auf niedrige Temperaturen gebracht wird, desto weniger wird sich die Lockerung der Masse und die Bildung von Rissen, soweit sie auf die Nachverdampfung zurückzuführen ist, auswirken können.

Wo die Abkühlung in der 60 bis 120 m langen Kühlrinne von der Presse bis zur Verladung nicht genügte, hat die Praxis verschiedene Wege eingeschlagen. Man vervielfachte die Länge der Kühlrinnen, indem der Brikettstrang jeder Presse abwechselnd einer Anzahl parallel laufender Rinnen zugeschaltet wird. Man vergrößert also die Kühldauer. Es sind

---

[3]) Niederschrift 8 des Ausschusses für Brikettfabriken 1928, S. 3, 4.

ferner die Batterien der Kühlrinnen von Eisenblechmänteln umkleidet worden, durch die künstlich Luft gesaugt wird, oder man belüftet die Waggons während der Füllung mit blasend wirkenden Luftströmen. Hierdurch wird der Wärmeübergang vom Brikett an die Luft verbessert. In neuerer Zeit ist berichtet worden,[4]) daß man die Briketts während der Schüttung in den Waggon überdies berieselt hat, um zusätzlich die Umgebungstemperatur durch Verdunstungskühle herabzusetzen. Schließlich hat man, um den außerordentlich guten Wärmeübergang an Wasser auszunutzen, Versuche mit Wasserkühlung angestellt, wobei der Brikettstrang durch einen Trog von 4 bis 12 m Länge geführt wurde.

Es reizte an sich schon, zur Klärung dieser Bemühungen um eine beschleunigte Abkühlung die physikalischen Grundlagen zu untersuchen, sowie exakte wissenschaftliche und praktische Untersuchungen darüber anzustellen, welcher Abkühlungsgrad technisch erreichbar ist, und mit welchen Mitteln eine Schnellkühlung ohne Gefährdung der Brikettgüte zu empfehlen ist. Der vorliegenden Arbeit wurde außerdem durch das Preisausschreiben des Deutschen Braunkohlen-Industrie-Vereins über eine Brikettverlademaschine noch ein besonderer Impuls gegeben.

Ein großer Teil des Versandes von Salonbriketts zu Hausbrandzwecken geschieht gegenwärtig durch Verpackung von Hand in Eisenbahnwaggons. Hierdurch soll einesteils die Bildung von Grus möglichst vermieden, andererseits dem Empfänger wunschgemäß das Ausladen erleichtert werden. Der Aufwand an Arbeitskräften verteuert die Verladung und die erforderlichen Mannschaften sind nicht immer vorhanden. Der Deutsche Braunkohlen-Industrie-Verein hat daher ein Preisausschreiben über den Entwurf einer Brikettverlademaschine erlassen; eine rege Beteiligung der einschlägigen Maschinenindustrie ist anzunehmen. Ein außerordentliches Erschwernis für die Maschine ist es, den bei dem heutigen Stande der Abkühlung der Briketts zur weiteren Kühlung im Waggon unbedingt erforderlichen Wechsel in der Verpackung zwischen Lage und Stempel oder die Aussparung von Kühlschächten der Handarbeit gleich herzustellen. Daher gestatten die von der Brikettindustrie gestellten Bedingungen, von den bis jetzt üblichen Stapelmethoden abzuweichen, sofern eine genügende Kühlung der Briketts gewährleistet ist, und eine Anzahl der Entwürfe wird im Interesse der Vereinfachung und der Betriebssicherheit, man könnte fast sagen, um die maschinelle Verpackung überhaupt zu ermöglichen, die vereinfachte Setzart: Lage auf Lage, mit der glatten Fläche nach unten, vorschlagen, wie sie heute bereits beim Verladen abgekühlter Briketts vom Vorratsstapel von Hand angewendet wird. Ein solcher Entwurf muß voraussetzen, daß die Steine vor der Verladung soweit abgekühlt werden,

[4]) Niederschrift 8, S. 4. Braunkohle 1928, S. 565.

daß die Ausbreitung des Restes von Kernwärme über den gesamten Brikettquerschnitt in Bezug auf Selbstentzündlichkeit und Brikettgüte unschädlich ist. Denn bei dieser Verpackart ist mit einer weiteren Abkühlung im Waggon nicht zu rechnen, und die sich einstellende Durchschnittstemperatur bleibt tagelang unvermindert erhalten. Dies ergab sich aus folgendem Versuch:

Es wurde auf einem Werk des Magdeburger Reviers ein Waggon so gepackt, wie dies eine Brikettverlademaschine von einfacher Konstruktion tun würde, Lage auf Lage, mit der glatten Fläche nach unten und nicht durch Stempel unterbrochen. Man hatte gehofft, eine bessere Kühlung gegenüber dem zur Zeit üblichen Verfahren dadurch zu erzielen, daß die einzelnen Lagen nacheinander horizontal über den ganzen Waggon ausgebreitet werden, und dabei eine volle glatte Breitseite noch 20 Minuten lang der abkühlenden Luft darbieten, bis sie von der nächsten Lage überdeckt werden. Bei der jetzt üblichen Setzart frischer Produktion wird die einzelne Lage schon nach ½ Minute von der nächsten überdeckt und nach 5 Minuten werden die benachbarten Stempel angesetzt, so daß von diesem Zeitpunkt ab nur noch die gewölbten Flächen mit der Luft in Berührung kommen. — Der Versuch zeigte jedoch, daß diese um ca. 20 Minuten verlängerte Berührungsdauer der Breitfläche mit der Luft auf die Abkühlung nur unwesentlichen Einfluß hatte, obwohl auf diesem Werk günstige Verhältnisse bestanden. Die Preßkohle hatte eine Temperatur von 46 °, die Kerntemperatur der austretenden Briketts betrug 57 °, die Länge der Kühlrinne annähernd 100 m. Die während des Setzens in den Waggon eingepackten Thermometer zeigten zunächst 36 ° an. Diese kann als Temperatur der Oberfläche der Steine während des Verladens angesehen werden. Infolge des Ausgleichs der Temperaturen der Oberfläche und des Kernes — der sogenannten Nacherwärmung — stiegen die Thermometer bald auf 49 °, welcher Wärmegrad mehrere Tage unverändert anhielt und dann nur langsam abnahm. Die aus dem Innern des Waggons entnommenen Probesteine waren mürbe und brüchig, und die Ladung wurde schließlich als minderwertige Qualität zu einem geringeren Preis abgegeben.

Bei der lange anhaltenden hohen Temperatur von ca. 50 ° stand das in der Brikettsubstanz enthaltene Wasser unter einem größeren Dunstdruck als bei niedrigen Temperaturen; dadurch entstand die Lockerung des Gefüges und eine Beeinträchtigung des Aussehens.

Wenn also die einfachste Setzart maschinell angewendet werden soll, so müßte vor der Verladung eine Abkühlung der Briketts bis auf eine Durchschnittstemperatur von etwa 25 ° stattfinden. Die Feststellung, innerhalb welcher Zeit diese ermöglicht werden kann, mit welchen Mitteln sie praktisch zu erzielen ist und welchen Einfluß eine

Schnellkühlung auf die Brikettgüte ausübt, war das Ziel der vorliegenden Arbeit.

Eine wesentliche Schwierigkeit schien bei der Inangriffnahme darin zu liegen, daß die Größe einer wichtigen Stoffkonstanten, der Wärmeleitzahl von Braunkohle und Braunkohlenbriketts nicht bekannt war. Es zeigte sich jedoch bei der Anwendung der Abkühlgesetze bald ein Weg, die Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Briketts mit einer Genauigkeit zu bestimmen, die den vorliegenden praktischen Zwecken genügte. Einerseits ließen sich die Zahlengrößen der übrigen die Abkühlung beeinflussenden Faktoren durch Parallelversuche ermitteln, bez. die ihnen innewohnende Ungenauigkeit konnte bei besonderer Versuchsanordnung nahezu ausgeschaltet werden; andererseits wurde der Abkühlverlauf in der Längsachse von Salonbriketts durch Thermometerbeobachtungen registriert. Hierdurch wurde die Wärmeleitzahl zur letzten Unbekannten in einer Berechnung mit bekanntem Ergebnis, und die durch Abkühlungs- oder besondere Erwärmungsversuche festgestellten Temperatur-Zeitkurven gaben einen Hinweis auf den Zahlenwert der Wärmeleitfähigkeit. Die so gefundene Größe konnte schließlich in die Berechnungen des Abkühlverlaufes eingesetzt werden; ihre Richtigkeit wurde durch andere Beobachtungen bestätigt.

II. Die physikalischen und rechnerischen Grundlagen der Abkühlung von Briketts.

1. Die physikalischen Begriffe.

Wärmeleitung ist ein direkter Übergang der Wärme von Molekül zu Molekül, ein Wärmefluß von den wärmeren Stoffteilen zu den benachbarten kälteren, bis ein Ausgleich der Temperaturunterschiede eingetreten ist, die zu Beginn des Vorganges vorhanden waren. Bei der Abkühlung der Briketts findet Wärmeleitung sowohl im Innern, als auch an den Berührungsflächen mit benachbarten Körpern statt; von ersterer soll zunächst die Rede sein. Die bei der Pressung entstandenen Temperaturunterschiede zwischen den höher erhitzten Randzonen und dem Kern gleichen sich aus, und in dem Maße, in dem sich die Oberfläche durch die Berührung mit der umgebenden Luft abkühlt, fließt Wärme vom Innern nach der Oberfläche. Für die Wärmeleitung im Innern des Briketts gilt folgende Definition: Die Menge der in einer bestimmten Zeit und längs eines gewissen Weges durch einen bestimmten Querschnitt des Körpers fließenden Wärme ist verhältnisgleich einer Stoffkonstanten, der Wärme-

leitzahl (WLZ, λ, kcal/m · h · ° C), und dem Temperaturunterschied zu Anfang und Ende des Weges. Je größer und je schneller nach Beginn des Kühlvorganges solche Temperaturunterschiede innerhalb des Brikettkörpers hervorgerufen werden, desto schneller die Abkühlung.

An den Begrenzungsflächen des Briketts findet durch die Berührung mit Körpern anderer Temperaturgrade W ä r m e ü b e r g a n g statt. Er umfaßt folgende Vorgänge:

Wärmestrahlung,
Wärmeleitung und Konvektion.

Die S t r a h l u n g von Wärme ist ein Aussenden von Energie, die beim Austritt aus dem strahlenden Körper in eine andere Form umgewandelt wird und sich beim Auftreffen auf einen anderen sie absorbierenden Körper wieder in die ursprüngliche Form zurückverwandelt. Streng genommen findet die Ausstrahlung zwar nicht an der Oberfläche des strahlenden Körpers statt, — es handelt sich nur um einen Durchtritt derjenigen aus dem Innern kommenden Strahlen, die nicht in das Innere zurückgeworfen werden —[5]), doch können wir der Kürze halber bei der gegebenen Vorstellung bleiben und die Wärmestrahlung unter die an der Oberfläche stattfindenden Vorgänge einreihen. Der durch Strahlung abgegebene Teil der Wärme ist, soweit er praktisch in Frage kommt, abhängig von einem Strahlungsfaktor, der Temperatur des Körpers sowie seiner Umgebung und der ausstrahlenden Flächengröße.

Wie bereits oben erwähnt, findet auch an der Berührung des Briketts mit seiner Umgebung W ä r m e l e i t u n g statt. Diese Umgebung ist meist Luft, sie könnte auch eine Flüssigkeit sein. Der Vorgang bleibt jedoch nicht auf Leitung, also direkte Übertragung der Wärme von Molekül zu Molekül beschränkt, sondern es kommt infolge Abwanderns einzelner erwärmter Teilchen und Nachströmens kälterer Teilchen eine molare Bewegung dazu, eine Fortführung oder Konvektion der Wärme. Soweit die Abwanderung der wärmetragenden Luft- oder Flüssigkeitsteilchen nur infolge ihres durch die Beladung mit Wärme veränderten spezifischen Gewichts geschieht, nennt man sie eine natürliche oder freie, wird die Bewegung absichtlich erteilt, künstliche Konvektion. W ä r m e l e i t u n g u n d K o n v e k t i o n an der Begrenzungsfläche des sich abkühlenden Körpers, die stets zusammen betrachtet werden sollen, ist also eine zweite Form des Wärmeüberganges.

Maßgebend für die gesamte durch Wärmeübergang in einer bestimmten Zeit und durch eine gewisse Fläche aus einem Körper austretende Wärmemenge ist die Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche des Körpers

---

[5]) t e n B o s c h : Die Wärmeübertragung, Berlin, Verlag Springer 1926, S. 2.

und seiner Umgebung und die Güte des Wärmeüberganges (Wärmeübergangszahl, WÜZ, α, kcal/m^2 · h · ° C). Hier liegt es weniger in unserer Macht, durch Erhöhung der Temperaturdifferenz Einfluß auf den Abkühlvorgang zu gewinnen. Es ist die Verbesserung des Wärmeüberganges selbst, die die abgeführte Wärmemenge in starkem Maße zu vergrößern und damit den zeitlichen Verlauf der Abkühlung zu beschleunigen vermag. Die Wärmeübergangszahl ist keine festliegende Konstante des Werkstoffes wie die Wärmeleitzahl, sondern verhältnismäßig leicht zu beeinflussen, und die künstliche Veränderung des Wärmeübergangs durch verstärkte Konvektion — Belüften der Briketts — oder durch Wahl eines anderen umgebenden Mediums — Wasser — gestatten eine Beschleunigung des Kühlvorganges auf etwa ein Drittel der unter üblichen Umständen erforderlichen Zeit.

Unter Anwendung der oben gegebenen Begriffe ist das Ziel einer beschleunigten Kühlung:

Durch Erhöhung des auf Wärmeleitung und Konvektion entfallenden Anteils des Wärmeübergangs ist eine schnelle Abkühlung der Brikettoberfläche und der angrenzenden Zonen zu schaffen; hierdurch entstehen beschleunigt größtmögliche Temperaturunterschiede im Brikett, die ein Maximum des Wärmeflusses vom Innern des Briketts nach den Begrenzungsflächen hervorrufen.

Schließlich kann noch Wärmedurchgang durch einen benachbarten festen Körper, beispielsweise eine das Brikett vollkommen berührende Stoffschicht in Frage kommen. Die aus dem Brikett durch ein Plattenstück von bestimmter Flächengröße in einer gewissen Zeit durchtretende Wärmemenge ist verhältnisgleich der Temperaturdifferenz und der Wärmedurchgangszahl (k, kcal/m^2 · h · ° C). Letztere ist abhängig von der Dicke und der Wärmeleitzahl der benachbarten Platte und dem Wärmeübergang, der an der abgewendeten Seite vorliegt. Die so ermittelte Wärmedurchgangszahl läßt sich, sofern sie bei den folgenden Untersuchungen eine Rolle spielen sollte, in die Abkühlungsgesetze an Stelle der Wärmeübergangszahl einsetzen. Ihre Dimension ist die gleiche.

2. Die rechnerischen Grundlagen.

Beim Anwärmen und Abkühlen von Körpern inmitten einer anders temperierten Umgebung finden anders geartete Vorgänge statt, als bei der Wärmeleitung und Wärmeübertragung im Beharrungszustand. Die Gesetze der letzteren stehen der Praxis infolge ihrer überragenden technischen Bedeutung — z. B. für die Dampferzeugung — in einem umfangreichen Schrifttum in leicht anwendbaren und handlichen Formeln seit

längerer Zeit zur Verfügung. Die rechnerische Betrachtung der Vorgänge der abklingenden Temperaturverteilung, d. h. des Ausgleiches der Temperaturunterschiede zwischen einem festen Körper und seiner gasförmigen oder flüssigen Umgebung, sind erst vor kurzer Zeit von Gröber[6]) dem Praktiker zugänglich gemacht worden, indem er die außerordentlich verwickelten mathematischen Formeln durch leicht zu handhabende Schaubilder ersetzte. Die von Gröber für einige geometrische Körper: Kugel, Zylinder und Platte gegebenen Lösungen gestatten mit annähernder Genauigkeit eine Anwendung auf die unseren Betrachtungen hauptsächlich vorliegenden Gebilde: Das Salon- und Sammelbrikett. Schlüsse auf andere Formate lassen sich leicht durch Übertragung der gesammelten Erfahrungen ziehen.

Da die einzelnen Steine eines in der Kühlrinne aufrückenden oder im Kühlschrank lagernden Brikettstranges mit den Schlagflächen noch leicht aneinander haften und eine Abkühlung in der Längsrichtung des Brikettstranges nicht stattfindet, stellt er in bezug auf die Abkühlung ein Gebilde von unendlicher Länge dar. (Abb. 1.) Um die Anwendung der Gesetze zu ermöglichen, werden die Wölbungen und Seitenflächen abgerundet angenommen, wodurch kein nennenswerter Fehler entsteht. Die Flächengröße eines 7″ Salonbriketts von der in Abb. 2 in natürlicher Größe dargestellten Form beträgt bei 180 mm Breite und 60 mm Höhe 100,69 qcm, die der durch Halbkreise abgerundeten Gestalt 100,25 qcm.

Es muß zunächst noch eine weitere Annahme gemacht werden: Der plattenförmige Mittelteil der Salonbriketts und die beiden Halbzylinder kühlen jeder für sich ab, indem ihre Berührungsflächen als vollkommen isolierend gedacht werden und ein Wärmeübertritt aus dem platten Teil nach den gewölbten Nachbarteilen nicht stattfindet. Der Wärmefluß ist also in der Platte vom Innern senkrecht zur Oberfläche, im Zylinder radial vom Zentrum aus gerichtet. Für den Anfang der Abkühlperiode trifft diese Annahme nahezu ein. Damit wird für die Beobachtung des Temperaturverlaufes die absolute Länge von Bp (Abb. 1) bedeutungslos, und wir können die Gesetze der Platte von unendlicher Länge und Breite benutzen.

Für die beiderseitige Abkühlung einer Platte ist der zeitliche Verlauf der Temperatur der Oberfläche nach Gröber gegeben durch den mathematischen Ausdruck

$$T_o = T_c \sum_{k=1}^{k=\infty} 2 \frac{\sin \delta_k}{\delta_k + \sin \delta_k \cos \delta_k} \cdot e^{-\delta_k^2 \frac{a\,t}{X^2}} \cos \delta_k \cdot$$

---

[6]) Gröber: Die Erwärmung und Abkühlung einfacher geometrischer Körper, Z. d. V. D. I. 1925, S. 705—711. Gröber: Einführung in die Lehre von der Wärmeübertragung, Berlin, Verlag Springer 1926, bes. S. 30—44. Gröber: Die Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeüberganges, Verlag Springer 1921, S. 44—60.

Diese Form ist für eine praktische Verwendung noch nicht geeignet. Daher soll hier darauf verzichtet werden, die ähnlich lautenden mathematischen Lösungen für die Temperatur der Achse und für den Wärmeverlust wiederzugeben.

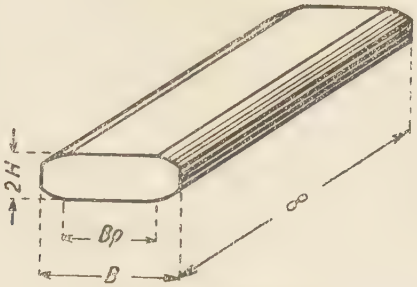

Abb. 1. Brikettstrang.

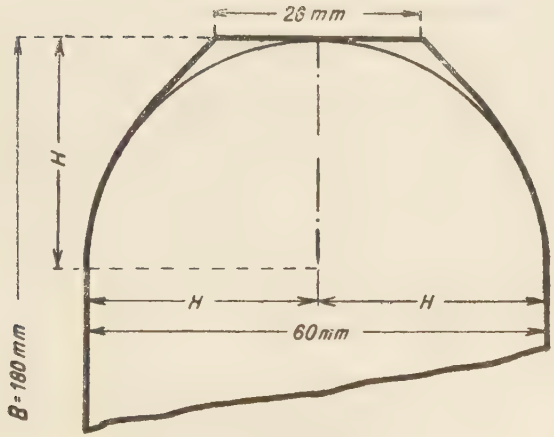

Abb. 2. 7″ Salonbrikett in nat. Gr.

Es werden zwei Kenngrößen eingeführt:

$$M = \frac{\alpha \cdot H}{\lambda},$$

$$N = \frac{\lambda \cdot z}{c \cdot \gamma \cdot H^2},$$

wobei bedeuten:

- α die Wärmeübergangszahl (kcal/m² · h · ° C),
- H die halbe Plattenstärke (m),
- λ die Wärmeleitzahl (kcal/m · h · ° C),
- c die spezifische Wärme (kcal/kg · ° C),
- γ das Raumgewicht (kg/m³),
- z die Zeit gerechnet vom Beginn der Abkühlung an (h).

Die Gleichungen für die Temperatur der Oberfläche, der Achse und für den Wärmeverlust nehmen dann folgende Form an:

1.) $$T_o = T_c \cdot \Phi_o\,(M, N) = T_c \cdot \Phi_o\left(\frac{\alpha \cdot H}{\lambda}, \frac{\lambda \cdot z}{c \cdot \gamma \cdot H^2}\right),$$

2.) $$T_m = T_c \cdot \Phi_m\,(M, N) = T_c \cdot \Phi_m\left(\frac{\alpha \cdot H}{\lambda}, \frac{\lambda \cdot z}{c \cdot \gamma \cdot H^2}\right),$$

3) $$Q = W_c \cdot \psi\,(M, N) = W_c \cdot \psi\left(\frac{\alpha \cdot H}{\lambda}, \frac{\lambda \cdot z}{c \cdot \gamma \cdot H^2}\right).$$

Hierbei ist [7])

T_c die Überschußtemperatur zu Beginn der Abkühlung über die Temperatur der Umgebung,

T_o die Überschußtemperatur der Oberfläche über die Temperatur der Umgebung,

T_m die Überschußtemperatur der Achse,

W_c der Wärmeüberschuß zu Beginn der Abkühlung über den Wärmeinhalt zu Ende der Abkühlung,

Q der Wärmeverlust zu einem Zeitwert z.

Ferner sei

t_a die gleichmäßig über den ganzen Querschnitt des Körpers herrschende Temperatur über 0 °C zu Beginn der Abkühlung, genannt Anfangstemperatur,

t_b Temperatur der Umgebung über 0 °C, zugleich Endtemperatur des abgekühlten Körpers über 0 °C,

t_o Temperatur der Oberfläche über 0 °C,

t_m Temperatur der Achse über 0 °C,

woraus folgt

$$T_c = t_a - t_b,$$
$$T_o = t_o - t_b,$$
$$T_m = t_m - t_b.$$

Die zahlenmäßigen Lösungen der oben wiedergegebenen drei Gleichungen hat Gröber in Zahlentafeln und Schaubildern dargestellt. Die Kenngröße M ist in diesen auf der Abszisse dargestellt, und zwar im logarithmischen Maßstab, um ihren ganzen zahlenmäßigen Bereich zu umfassen. Die Kenngröße N ist auf den Kurven aufzusuchen, worauf auf der Ordinate die Werte der Funktionen Φ_o und Φ_m abgelesen werden können. Die so aus den ersten beiden Grundformeln ermittelten Zahlenwerte sind die Quotienten

$$\frac{T_o}{T_c} \text{ und } \frac{T_m}{T_c}.$$

Multiplikation mit T_c ergibt die Werte für T_o und T_m; Addition mit t_b die Werte für t_o und t_m.

[7]) Zusammenstellung sämtlicher Buchstaben-Bezeichnungen siehe S. 101/102.

Für den Abkühlverlauf des Zylinders gelten die gleichen Ausdrücke, indem eingesetzt wird

$$H = \text{Radius des Zylinders (m)}.$$

Die Abbildungen 3 und 4 geben eine Vergrößerung eines Teiles der Gröberschen Schaubilder, und zwar für denjenigen Bereich, den die Kenngröße M bei Einsatz der möglichen Werte von α, H und λ bei den beabsichtigten Brikettuntersuchungen annehmen kann. Diese Vergrößerungen konnten an Hand der von Gröber gegebenen Zahlentafeln vorgenommen werden.

Die dritte Gleichung gestattet eine unseren Zwecken dienstbare Umformung. In der auf S. 14 ersichtlichen Form ergibt sie den jeweiligen in kcal ausgedrückten Wärmeverlust Q zu einem Zeitwert z, vom Beginn der Abkühlung an gerechnet. Dem Brikettfabrikanten würde jedoch diese Angabe nicht viel nützen, da er sich praktisch unter einer Anzahl von Kalorien nichts vorstellen kann. Da ferner der Wärmeinhalt oder Wärmeverlust (kcal) eines Körpers erst bei gleichzeitiger Angabe seines Gewichtes G (kg) einen Schluß auf den Wärmezustand zuläßt, würden wir gezwungen sein, sämtliche Berechnungen an einem einheitlichen Brikettgewicht auszuführen bez. die Versuche auf ein solches umzurechnen, um eine Auswertung zu ermöglichen. Aus diesen praktischen Erwägungen heraus soll daher statt des Wärmeverlustes Q, bez. statt des jeweilig noch vorhandenen Wärmeüberschusses W die Durchschnittstemperatur (T_d oder t_d) eingeführt werden. T_d wird von der Endtemperatur ab gerechnet, t_d von 0 ° ab.

$$T_d = t_d - t_b.$$

Die im Verlauf der Abkühlung abzuführende Wärmemenge, d. h. der Wärmeüberschuß zu Beginn der Abkühlung, ist

$$W_c = T_c \cdot c \cdot G.$$

Zu einem beliebigen Zeitpunkt der Abkühlung ist der jeweilig noch vorhandene Wärmeüberschuß

$$W = T_d \cdot c \cdot G,$$

oder die Durchschnittstemperatur ist

$$T_d = \frac{W}{c \cdot G}.$$

Sie ist also dem Wärmeinhalt pro Brikettgewicht verhältnisgleich, und zwar sowohl für den Teil eines Briketts, ein ganzes Brikett oder für einen Teil des Brikettstranges.

Während der Abkühlung wird T_d einen Wert zwischen T_o und T_m den Temperaturen der Oberfläche und der Brikettachse einnehmen. Ihre Größe ist jedoch nicht das arithmetische Mittel aus T_o und T_m, sondern richtet sich nach der Verteilung der Temperaturen im Brikett.

Diese Durchschnittstemperatur T_d bez. t_d ist die wichtigste Größe der Untersuchungen über die Abkühlung der Briketts. Wie schon aus der Einleitung hervorgeht, hat sie einen besonderen Wert für die Praxis. Sie stellt nämlich diejenige Temperaturhöhe dar, die sich gleichmäßig über den ganzen Brikettkörper einstellen würde, wenn der Abkühlungsvorgang zu einem gewissen Zeitpunkt unterbrochen würde. Dieser Fall tritt dann ein, wenn das Brikett im Waggon verpackt wird und mit dem größten Teil seiner Begrenzungsflächen andere Briketts berührt, so daß die Abkühlung in diesen Richtungen unterbunden ist oder mindestens nur noch ganz langsam weiter fortschreitet. Unsere Untersuchungen sollen mit dem Ziele geführt werden, zu jedem Zeitpunkt des Abkühlungsvorganges in der Lage zu sein, über diese Durchschnitts- oder Gesamttemperatur des Briketts Aufschluß geben zu können. Diese Angabe wird dem Brikettfabrikanten wichtiger sein, als eine in Kalorien ausgedrückte Wärmemenge.

Die auf Seite 14 für den Wärmeverlust gegebene Gleichung lautet

$$\frac{Q}{W_c} = \psi(M, N).$$

Da nach den oben gegebenen Definitionen

$$W_c = Q + W,$$

ist, so kann gesetzt werden

$$\frac{Q}{W_c} = 1 - \frac{W}{W_c} = \psi(M, N),$$

$$\frac{W}{W_c} = 1 - \psi(M, N),$$

$$\frac{T_d \cdot c \cdot G}{T_c \cdot c \cdot G} = 1 - \psi(M, N),$$

$$\frac{T_d}{T_c} = 1 - \psi(M, N).$$

Es mußte also bei der Vergrößerung des von Gröber zur Bestimmung des Wärmeverlustes gegebenen Schaubildes die Bezifferung der Ordinate so vorgenommen werden, daß nicht die Werte von

$$\psi(M, N) = \frac{Q}{W_c},$$

sondern von

$$1 - \psi(M, N) = \frac{T_d}{T_c}$$

abgelesen werden. Dies war dadurch leicht zu bewerkstelligen, daß die Ordinate anstatt von 0 bis 1, entgegengesetzt von 1 bis 0 beziffert wurde. In unseren Schaubildern (Abb. 3 und 4) erscheinen dadurch die N-Kurven für die Durchschnittstemperaturen im Spiegelbild zu den von Gröber

gegebenen Kurven. Die für den Abkühlverlauf geltenden drei Gleichungen lauten nunmehr

1.) $T_o = T_c \cdot \Phi_o (M, N)$,

2.) $T_m = T_c \cdot \Phi_m (M, N)$,

3.) $T_d = T_c \cdot [1 - \psi (M, N)] = T_c \Phi_d (M, N)$.

Die Faktoren, die die Abkühlung der Briketts beeinflussen, sollen im dritten Teil der Abhandlung besprochen werden. Um einige

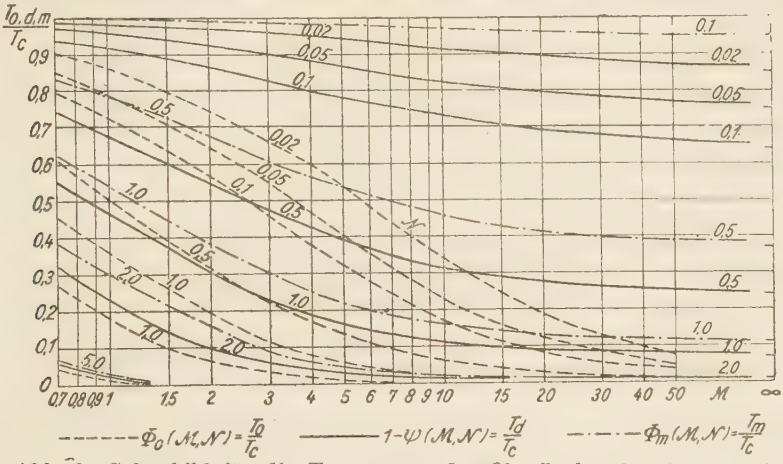

Abb. 3. Schaubild für die Temperatur der Oberfläche, der Achse und für die Durchschnittstemperatur der Platte.

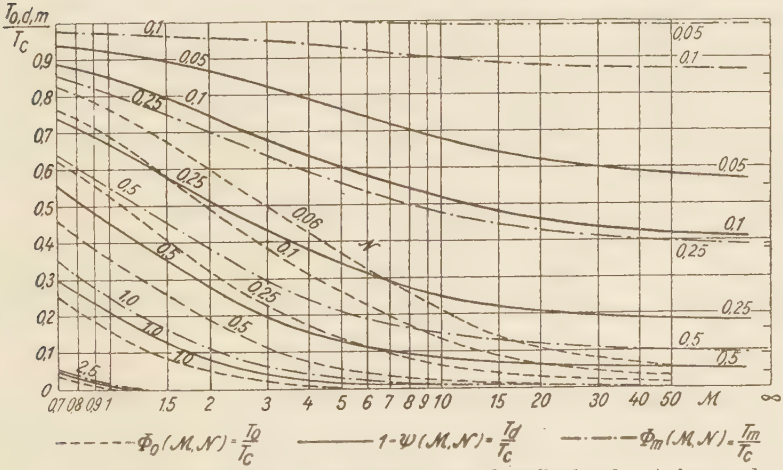

Abb. 4. Schaubild für die Temperatur der Oberfläche der Achse und für die Durchschnittstemperatur des Zylinders.

praktische Vorstellungen über die Auswertung der Abkühlgesetze zu erhalten, werden zunächst unter Annahme von mittleren Zahlenwerten für

Anmerkung: Bei der Ausführung der Berechnungen dienten Schaubilder im großen Maßstab.

spezifische Wärme, Raumgewicht, Brikettstärke und Überschußtemperatur, sowie von Grenzwerten für den Wärmeübergang einige Rechnungen durchgeführt und die Temperatur-Zeitkurven entworfen. Die Wärmeleitfähigkeit wird mit dem Zahlenwert, der für ein Werk der Niederlausitz ermittelt wurde, eingesetzt.

Anfangstemperatur	$t_a = 65\,^{\circ}$,
Endtemperatur	$t_b = 20\,^{\circ}$,
Überschußtemperatur	$T_c = t_a - t_b = 45\,^{\circ}$,
Wärmeleitzahl	$\lambda = 0{,}23$,
Spezifische Wärme	$c = 0{,}49$,
Raumgewicht	$\gamma = 1150$,
Halbe Stärke des Salonbriketts	$H = 0{,}03$ m,
Wärmeübergang in ruhender Luft unterer Grenzwert	$\alpha = 8$.

Bei Abkühlung in ruhender Luft, wie sie heute meist im Brikettstrang stattfindet, sind hiernach Kenngrößen:

$$M = \frac{\alpha \cdot H}{\lambda} = \frac{8 \cdot 0{,}03}{0{,}23} = 1{,}042\,.$$

$$N = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma \cdot H^2} \cdot z = \frac{0{,}23}{0{,}49 \cdot 1150 \cdot 0{,}0009} \cdot z = 0{,}454 \cdot z\,.$$

Bei der Berechnung des Abkühlungsverlaufes des mittleren plattenförmigen Briketteiles ist zunächst auf der Abszisse $M = 1{,}042$ aufzusuchen. Würde man dann in die obige Formel für N beliebige Zeitwerte (z) einsetzen, so müßte eine Interpolation der so erhaltenen N-Werte zwischen die im logarithmischen Maßstab vorhandenen N-Kurven stattfinden, die nur schwer mit der nötigen Genauigkeit ausgeführt werden könnte und außerdem sehr zeitraubend wäre. Daher werden am besten lediglich solche Werte von N benutzt, die als Schnittpunkte mit den Ordinaten schnell und genau aufgesucht werden können.

Bei $M = 1{,}042$ sind dies beispielsweise die Werte

$$N = 0{,}02;\ 0{,}05;\ 0{,}1;\ 0{,}5;\ 1{,}0;\ 2{,}0;\ 5{,}0.$$

Bei $N = 0{,}454 \cdot z$ entsprechen diesen N-Werten folgende Werte für z:

$$z = \frac{N}{0{,}454}$$

$$z = 0{,}04;\ 0{,}11;\ 0{,}22;\ 1{,}10;\ 2{,}20;\ 4{,}41;\ 11{,}00.$$

Die auf den Ordinaten an den Schnittpunkten mit den Kurven gesuchten Werte der Temperaturquotienten

$$\frac{T_o}{T_c},\ \frac{T_m}{T_c} \text{ und } \frac{T_d}{T_c}$$

gelten also für diese Werte der Zeit z vom Beginn der Abkühlung an gerechnet. Wenn sie zum Teil etwas weit auseinander liegen, z. B. 1,10 h und 2,20 h, so muß man sich darüber klar sein, daß die graphische Inter-

polation leichter und immer noch genauer ist, als eine logarithmische in den Schaubildern gewesen wäre. Die der Ordinate entnommenen Temperaturquotienten werden mit T_c multipliziert; durch Addition mit t_b erhält man die Temperaturen der Oberfläche t_o, der Plattenachse t_m und die Durchschnittstemperaturen des Plattenkörpers t_d, die nunmehr als Ordinaten zu den entsprechenden Zeitwerten registriert werden. Die Berechnung für die Platte ist aus folgendem Zahlenbeispiel ersichtlich:

$t_a = 65\,°$, $t_b = 20\,°$, $T_c = 45\,°$.

$$M = \frac{\alpha \cdot H}{\lambda} = \frac{8 \cdot 0{,}03}{0{,}23} = 1{,}042\,.$$

$$N = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma \cdot H^2} \cdot z = \frac{0{,}23}{0{,}49 \cdot 1150 \cdot 0{,}0009} \cdot z = 0{,}454 \cdot z\,.$$

N	0,02	0,05	0,1	0,5	1,0	2,0	5,0
z	0,04	0,11	0,22	1,10	2,20	4,41	11,00
$\frac{T_o}{T_c}$	0,855	0,784	0,720	0,495	0,342	0,163	0,007
$\frac{T_d}{T_c}$	0,980	0,960	0 915	0,670	0,460	0,218	0,016
$\frac{T_m}{T_c}$			0,998	0,779	0,530	0,290	0,024
t_o	58,5	55,2	52,4	42,3	35,4	27,3	20,3
t_d	64,1	63,2	61,1	50,2	40,7	29,7	20,7
t_m	65,0	65,0	64,9	55,0	43,8	33,1	21,1

Nunmehr soll der Abkühlungsverlauf für einen oberen Grenzwert des Wärmeüberganges berechnet werden. Für die Abkühlung im Wasser würde, worauf später näher eingegangen wird (Seite 77),

$$\alpha = 400 \text{ bis } 3000$$

in Betracht kommen. Bei Einsatz dieser Zahlen, beispielsweise $\alpha = 500$, gestattet die Kenngröße

$$M = \frac{\alpha \cdot H}{\lambda} = \frac{500 \cdot 0{,}03}{0{,}23} = 65{,}2$$

jedoch keine genaue Ablesung der Funktionswerte für die Oberflächentemperatur in den Schaubildern [8]). Bei dem sehr guten Wärmeübergang

[8]) Die Schaubilder sind nur soweit entworfen, als eine genügende Genauigkeit der Werte bestand. Persönliche Mitteilung von Professor Dr. Gröber an den Verfasser.

nimmt die Oberfläche sofort die Temperatur der Umgebung an, und ihr Verlauf läßt sich zeichnerisch nicht mehr darstellen. Wir benötigen jedoch für die spätere Darstellung der Isothermen einige Werte von t_o. Daher soll α zunächst mit dem geringsten Zahlenwert eingesetzt werden, ohne daß, wie später nachgewiesen wird, damit ein wesentlicher Einfluß auf das allgemeine Resultat ausgeübt wird. Die letzten Werte für die Oberflächentemperatur sind in den Schaubildern bei $M = 50$ abzulesen. Bei $\alpha = 400$ würde betragen

$$M = \frac{\alpha \cdot H}{\lambda} = \frac{400 \cdot 0{,}03}{0{,}23} = 52.$$

Abb. 5 und 6 zeigen den Verlauf der Temperaturen in Abhängigkeit von der Zeit.

Bei $\alpha = 8$ fällt die Temperatur t_o der Plattenoberfläche (gestrichelte Linie) zunächst schnell, biegt jedoch dann in eine flache Neigung um, da die Angleichung an die Temperatur der Umgebung infolge schlechten Wärmeüberganges gering ist. In der Plattenachse (t_m-Kurve, strichpunktiert) bleibt die Temperatur noch ungefähr 0,2 St = 12 Minuten auf der anfänglichen Höhe; erst nachdem im Brikettkörper Temperaturunterschiede eingetreten sind, beginnt die Wärme auch aus der Mitte abzufließen. Aus der zwischenliegenden Kurve der Durchschnittstemperatur t_d ist abzulesen, daß die Brikettplatte nach ½ Stunde noch eine Gesamttemperatur von $t^d = 57°$ hat, daß also nur geringe Erniedrigung eingetreten ist. Erst nach 9 Stunden ist sie auf 22,3°, nach 11 Stunden auf 20,7° gefallen.

Anders bei WÜZ $\alpha = 400$. Der gute Wärmeübergang bewirkt einen plötzlichen Abfall der Temperatur der Oberfläche, demgemäß erreicht auch der Wärmefluß den Kern früher und die t_m-Kurve sinkt zeitiger und steiler ab. Die Gesamttemperatur ist nach ½ Stunde bereits auf $t_d = 40°$ gefallen.

Bei den Temperatur-Zeitkurven mit WÜZ $\alpha = 8$ verläuft die t_o-Kurve dicht bei der t_m-Kurve, es treten keine großen Temperaturunterschiede in der Platte auf, und der Wärmefluß aus dem Innern nach der Oberfläche ist infolgedessen gering; die Abkühlung des Briketts wird an der Oberfläche gehemmt. Bei dem fast widerstandslosen Wärmeübergang mit $\alpha = 400$ dagegen gleicht sich die Oberfläche fast augenblicklich der Temperatur der Umgebung an, und der große Temperaturunterschied zum Brikettkern verursacht einen so starken Wärmefluß, als es das Wärmeleitvermögen zuläßt. Steigerung der abgegebenen Wärmemenge wäre nur zu erzielen, indem t_o noch plötzlicher fallen würde, was fast nicht mehr möglich ist. Wir sind also mit $\alpha = 400$ nahezu an der Grenze der Abkühlungsgeschwindigkeit. Die Hemmung des Wärmeflusses liegt nunmehr im Brikettinnern, verursacht durch das schlechte Wärmeleitvermögen der Brikettsubstanz $\lambda = 0{,}23$.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Temperatur-Zeitkurven bei der Abkühlung eines Zylinders von 6 cm Durchmesser (Abb. 6). Das Verhältnis der Oberfläche zum Inhalt ist beim Zylinder größer, als bei der unendlich lang und breit angenommenen Platte. Die kühle Außentempera-

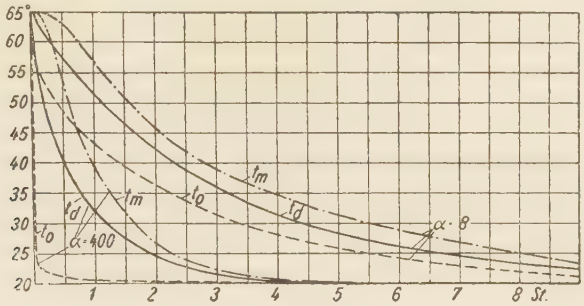

Abb. 5. Temperatur-Zeitkurven des plattenförmigen Mittelteils des Brikettstranges bei Abkühlung in ruhender Luft ($\alpha = 8$) und im Wasser ($\alpha = 400$).

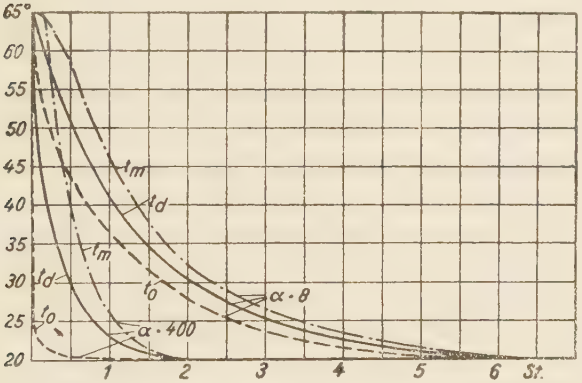

Abb. 6. Temperatur-Zeitkurven des Brikettzylinders von 6 cm Durchmesser bei Abkühlung mit $\alpha = 8$ und $\alpha = 400$.

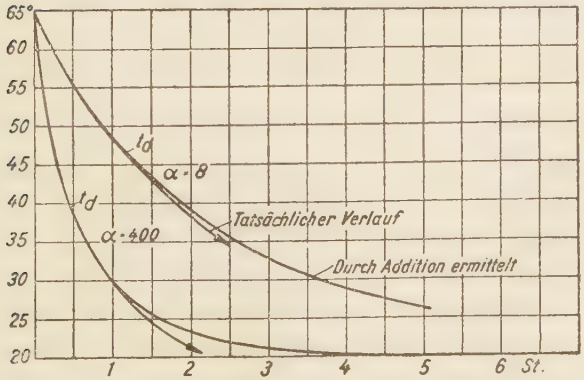

Abb. 7. Durchschnittstemperatur des Brikettstranges bei Abkühlung in ruhender Luft ($\alpha = 8$) und im Wasser ($\alpha = 400$).

tur dringt von allen Seiten gegen die Achse vor. Daher fallen die Temperatur-Zeitkurven des Zylinders schneller als die der Platte.

Durchschnitts- oder Gesamttemperaturen t_d

nach Stunden		½	1	1½	2	3	4	5
$\alpha = 8$	Platte	57,3	51,2	46,5	42,2	35,8	31,3	28,4
	Zylinder	50,6	41,2	34,8	30,3	25,3	22,6	21,0
$\alpha = 400$	Platte	40,4	32,0	27,6	24,5	21,7	20,5	20,0
	Zylinder	30,0	23,0	20,7	20,0			

Durch ein gleichfalls von Gröber angegebenes zeichnerisches Verfahren läßt sich die Verteilung der Temperaturen in dem abkühlenden Körper längs einer in Richtung des Wärmeflusses gedachten Ebene zu gewissen Zeitpunkten darstellen. Die Abszisse gibt diesmal den Abstand vom Abkühlungszentrum an. Vergleiche Abb. 8. Da das Temperaturgefälle, wie im Grundriß durch Pfeile angedeutet, symmetrisch zur Platten- bez. Zylinderachse verläuft, genügt die Darstellung je einer Hälfte des Körpers im Aufrißschnitt. Abb. 8 zeigt in der linken Hälfte die Temperaturverteilung in der Platte nach einer Abkühlungsdauer von ½, 1, 1½, 2 Stunden, und zwar links bei $\alpha = 8$ und rechts bei $\alpha = 400$; in der rechten Hälfte ist der Temperaturverlauf im Zylinder längs einer Radialebene ersichtlich.

Diese zeichnerische Darstellung geschah folgendermaßen. Auf der Ordinate wurden die Temperaturen von 20 bis 65 °, auf der Abszisse die halbe Dicke, bez. der halbe Durchmesser H von der Achse aus nach beiden Seiten aufgetragen. An den jeweiligen Endpunkt wurde die Länge der

$$\text{Subtangente } \frac{\lambda}{\alpha} = \frac{0{,}23}{8} = 0{,}02875 \text{ m, bez. } \frac{0{,}23}{400} = 0{,}0006 \text{ m}$$

im gleichen Maßstab, der für die Darstellung von H gewählt wurde, angesetzt [9]). Der Endpunkt auf der Abszisse ist jedesmal der Schnittpunkt für sämtliche Tangenten der Temperaturkurven. Wird z. B. aus Abb. 5 entnommen, daß die Temperatur der Plattenoberfläche nach $z = 0{,}5\,h = ½$ Stunde Abkühlung $t_o = 49$ ° beträgt, so ist die geradlinige Verbindung von dem Endpunkt der Subtangente nach dem Zahlenwert $t_o = 49$ ° auf der als Plattenoberfläche gedachten Ordinate (Abb. 8 links) die

[9]) Gröber, Wärmeübertragung, a. a. O., S. 7—9, 12 und 43.

Tangente der Temperaturkurve für den Zeitpunkt $z = \frac{1}{2}$ Stunde. Andererseits ist die Temperatur der Plattenachse in diesem Zeitpunkt aus Abb. 5 bekannt; $t_m = 63°$. Die Parallele zur Abszisse durch $t_m = 63°$ gibt die Tangente des Temperaturverlaufes in der Plattenmitte. Nach diesen beiden Tangenten kann der Temperaturverlauf zeichnerisch dargestellt werden.

Das Verfahren droht bei einem großen Wert von a gegenüber einem kleinen von λ zu versagen. Der Endpunkt der Subtangente 0,0006 m als Sammelpunkt der Tangenten liegt dann so dicht am Endpunkt von H, daß die Tangente in diesem Maßstab recht unbestimmt zu sein scheint. Ihre Richtung kann indessen trotzdem genauer ermittelt werden, indem die Subtangente und der ihr entsprechende Temperaturabschnitt auf der Ordinate vorübergehend im 10- bis 20-fach vergrößerten Maßstab herausgezeichnet und die so erhaltene Richtung parallel verschoben wird.

Außerdem ist durch die Umformung der dritten Grundgleichung der jeweilige Wert von t_d bekannt; er wird aus Abb. 5 nach ½stündiger Abkühlung zu $t_d = 57{,}3°$ entnommen. Die Parallele zur Abszisse durch den Zahlenwert $t_d = 57{,}3°$ muß also mit der Abszisse dieselbe Flächengröße wie die Temperaturkurve einschließen. Man hat also bei der zeichnerischen Darstellung des Temperaturverlaufes eine Kontrolle darin, daß auch die in Abb. 8 schraffierten Flächen einander gleich sein müssen.[10])

Beim Entwurf der Temperaturverteilung im Zylinder wurde ähnlich verfahren. Die t_m-t_o-Kurve längs des Zylinderradius konnte annähernd als Erzeugende eines Kegelmantels aufgefaßt werden. Der Rauminhalt des Kreiskegels ist dem dritten Teil seiner Höhe proportional. Die in Abb. 8 entworfenen Temperaturkurven wurden also derart mit der t_d-Horizontalen zum Schnitt gebracht, daß die nach dem Innern eingeschlossene Fläche etwa doppelt so groß ist, als die nach dem Rande zu gebildete. (Siehe Schraffur in Abb. 8.)

Es war oben die Annahme gemacht worden, daß sowohl die Halbzylinder zu beiden Seiten der Platte, als auch die Platte für sich getrennt abkühlen. Mit dieser Annahme wäre ein Temperatursprung an der Berührungsfläche verbunden, dessen Höhe in Abb. 9 veranschaulicht ist. Die schwach punktierten Kurven geben den Temperaturverlauf im Zylinder nach Abb. 8, die Horizontalen die jeweiligen Tem-

---

[10]) Williamson und Adams haben im Physical Review 1919, Vol. XIV Series II, S. 108 und 112 den Temperaturverlauf in Kugel, Platte und Zylinder dargestellt, deren Oberfläche von außen erhitzt wird. Die Formgebung dieser Kurven ist dieselbe, wie oben entworfen.

peraturen der Plattenmitte an. Dazwischen würde ein Temperatursprung stattfinden, der z. B. bei ½stündiger Abkühlungsdauer betragen würde:

Temperatur im Mittelpunkt des Zylinders t_m 57,2°
in der Plattenachse t_m 63,0°

und durch einen Übergang ausgeglichen werden muß.

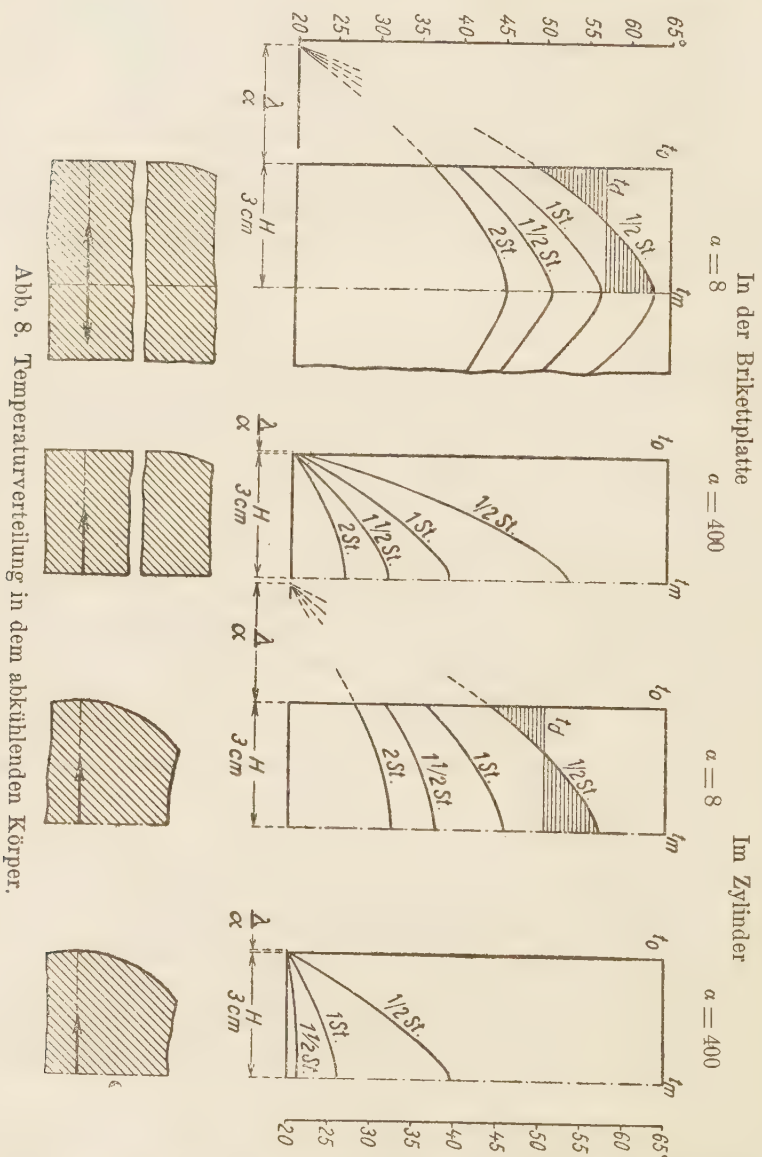

Abb. 8. Temperaturverteilung in dem abkühlenden Körper.

Beim Entwurf dieser Übergangskurven dienten die aus folgenden Überlegungen übertragenen Erfahrungen. Die Temperaturhöhe in der Längsachse des Brikettstranges unterliegt im plattenförmigen Teil hauptsächlich dem

Wärmeabfluß nach den ebenen Begrenzungsflächen, der in Abb. 9 im Grundriß durch parallele Pfeile ersichtlich ist. Dieser bewirkt ein gleichmäßiges Absinken der Temperaturen, wie im Aufriß durch die punktierten horizontalen Geraden für die Abkühlungszeiten von ½ bis 2 Stunden angedeutet. Aber auch die schmalen seitlichen Begrenzungsflächen des Briketts bleiben auf dem Temperaturverlauf im Brikettinnern nicht ohne Einfluß; sie erzeugen einen annähernd parallel zur Längsachse gerichteten Wärmefluß, der nach einer genügend langen Dauer schließlich eine zusätzliche Temperaturverminderung im Mittelpunkt der Briketts zur Folge haben muß.

Um über diesen Wärmefluß und die durch ihn hervorgerufene Temperaturverteilung ein Bild zu bekommen, wurde der Abkühlungsverlauf

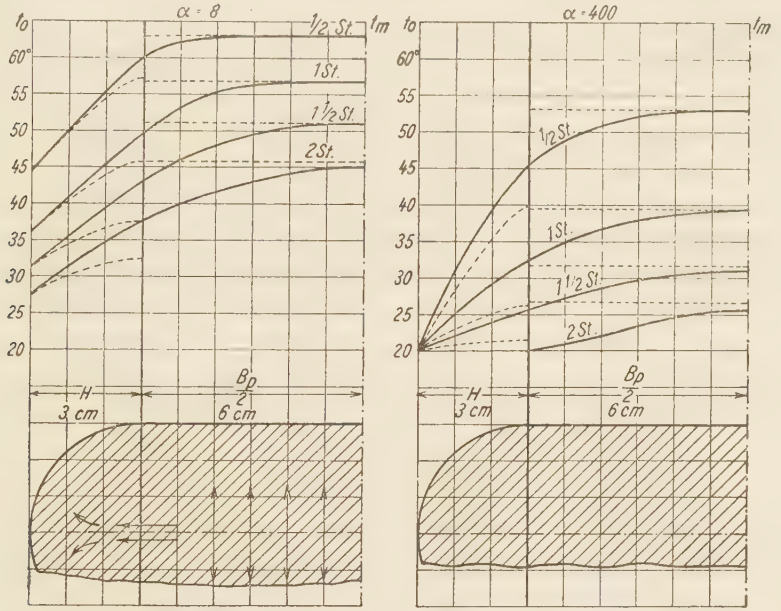

Abb. 9. Temperaturverteilung im Längsschnitt des Brikettstranges bei $\alpha = 8$ und $\alpha = 400$.

einer Platte von 18 cm Dicke berechnet. Bei $\alpha = 8$ ergab sich, daß eine Dauer von 1½ Stunden erforderlich ist, um auf t_m einzuwirken. Erst nach 2 Stunden wäre t_m auf 64,3°, also um 0,7° gesunken. Auch wurde der Temperaturverlauf innerhalb dieser Platte graphisch dargestellt, und die Form der so erhaltenen Kurven wurde beim Entwurf der Temperaturkurven in Abb. 9 mit verwertet.

Nun unterliegt jedoch der nach den gewölbten Brikettseitenflächen gerichtete Wärmefluß der Zonen an der Längsachse nicht genau den für die Platte geltenden Abkühlungsgesetzen. Es wurde daher vergleichsweise die Berechnung noch auf einen Zylinder von 18 cm Durchmesser ausgedehnt. Die Temperatur des Mittelpunktes würde bei $\alpha = 8$ nach 2 Stun-

den bereits um 2 bis 3° sinken. Verfasser konnte sich jedoch nicht entschließen, diese Ergebnisse zu übertragen. Im Zylinder dringt die Abkühlung von allen Seiten gleichmäßig vor, wie dies schon aus dem mehr gradlinigen Verlauf der Temperaturverteilung im Zylinder zu schließen ist. Dies trifft bei dem hier betrachteten zusätzlichen Wärmefluß in der Brikettachse im wesentlichen Teil nicht zu.

Bei dem als obere Grenze angenommenen Zahlenwert des Wärmeüberganges ($\alpha = 400$) greift auch die Abkühlung längs der Brikettachse stärker durch. Sie würde bei der Platte bereits nach 1 Stunde den Mittelpunkt erreichen, und seine Temperatur nach 2 Stunden um 2 bis 3° gesenkt haben (Abb. 9, rechte Hälfte).

Die Ergebnisse der Abbildungen 8 und 10 lassen sich zu einer Darstellung der Isothermen im Brikett (Abb. 10) verwenden. Längs des

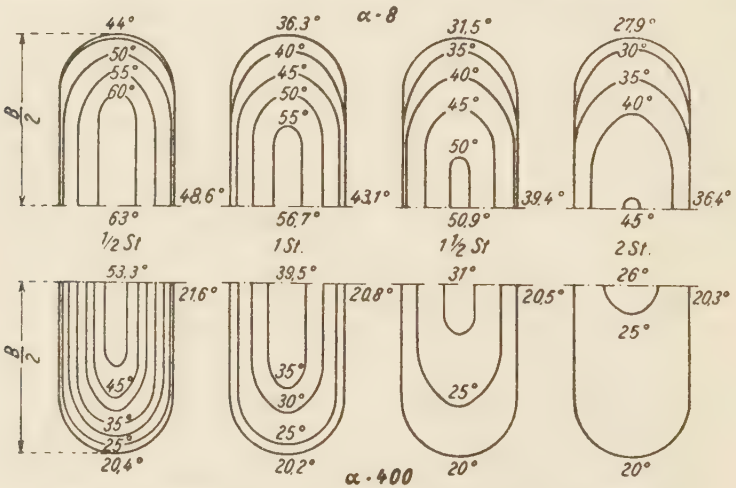

Abb. 10. Isothermen im Brikett während der Abkühlung.
Obere Reihe: In ruhender Luft ($\alpha = 8$).
Untere Reihe: Im Wasser ($\alpha = 400$).

plattenförmigen Teiles laufen diese parallel zu den ebenen Begrenzungsflächen, in der Nähe der zylindrischen Außenflächen konzentrisch zu diesen. Dazwischen wurden angleichende Übergänge entworfen. Infolge der schnelleren Abkühlung des Zylinders treten einige Isothermen aus dem gewölbten stärker abgekühlten Teil nicht mehr in die Platte ein. Eine Bestätigung findet man, wenn man ein Salonbrikett während der Abkühlung anfühlt. Das plattenförmige Mittelstück fühlt sich stets wärmer an als die Wölbungen.

Eine große Anzahl von Isothermen ist in dem mit $\alpha = 400$ gekühlten Brikett nach etwa ½stündiger, in dem in ruhender Luft ($\alpha = 8$) gekühlten Stein nach etwa 1stündiger Abkühlungsdauer ersichtlich. Dies ist also der

Zeitpunkt, den man für das Vorliegen der größten Temperaturspannungen im Brikett annehmen muß, denen mitunter ein Einfluß auf die Briketqualität zugeschrieben wird. Hierauf wird bei Besprechung des Einflusses der Schnellkühlung auf die Festigkeit der Steine zurückgekommen werden (S. 92).

Die Teilung des Salonbriketts in einen plattenförmigen Mittelteil und zwei anschließende Halbzylinder veranlaßte im Verlauf der vorhergehenden Betrachtungen zu einer Anzahl von Annahmen und Abrundungen, die sich mathematisch und physikalisch nicht immer streng rechtfertigen lassen, und zum Teil gefühlsmäßig durchgeführt werden mußten. Wir sind jedoch auf diese Teilung und getrennte Grundbetrachtung angewiesen, da die Gesetze der abklingenden Temperaturen für das ganze Salonformat nicht zur Verfügung stehen, und Verfasser glaubt den tatsächlichen Verhältnissen immer noch nahe genug gekommen zu sein, um die Fragen der Kühlung von Briketts über das bisher darüber Bekannte hinaus zu fördern.

Die Versuche, die zur Ermittlung der Wärmeleitzahl und von Wärmeübergangszahlen ausgeführt wurden, bestätigten die hier gemachten Annahmen. Die Temperatur-Zeitkurven der Plattenachse wurden praktisch durch in die Längsachse der Salonbriketts eingesteckte Thermometer, deren Quecksilber sich im Mittelpunkt des Briketts befand, ermittelt und mit den theoretisch errechneten Kurven verglichen. Die auf diese Weise aufgezeichneten Kurven wichen im Verlauf der Abkühlung von den rechnerisch ermittelten ab und neigten sich stärker. Bei schlechtem Wärmeübergang ($\alpha = 8$ bis 10) begann dies nach etwa 1½ Stunden, bei gutem Wärmeübergang ($\alpha = 50$ bis ∞) schon nach 1 Stunde.

Bei der nunmehr folgenden Berechnung des Wärmeverlustes oder der Durchschnittstemperatur des ganzen Briketts soll, wie bisher bei der Darstellung der Temperaturkurven und Isothermen, die Vorsicht leiten, nicht mehr an Abkühlung herauszurechnen, als sich rechnerisch verantworten läßt. Für die erste Zeit der Abkühlung wird eine Addition der Durchschnittstemperaturen der Platte und des Zylinders im Verhältnis der auf sie entfallenden Gewichtsteile die tatsächlich vorliegende Gesamttemperatur t_d ergeben.

Der Wärmeinhalt des Briketts ist gleich der Summe der Wärmeinhalte der Platte und der beiden Halbzylinder. Der Wärmeinhalt jedes dieser Körper ist gleich dem Produkt aus Durchschnittstemperatur, Vorderfläche, Dicke, spezifischem Gewicht und spezifischer Wärme. Die drei letztgenannten Größen sind bei allen drei Körpern einander gleich. Ist
F die Vorderfläche und t_d die Durchschnittstemperatur des Briketts,
F_p „ „ „ t_{dp} „ „ des platten Teiles,
F_z „ „ „ t_{dz} „ „ der zylindrischen Teile,
so ist demnach

$$F \cdot t_d = F_p \cdot t_{dp} + F_z \cdot t_{dz}$$
$$F_p = 12 \cdot 6 = 72 \quad \text{qcm},$$
$$F_z = \pi \cdot 3^2 = 28{,}25 \quad \text{„}$$
$$F = 100{,}25 \quad \text{„}$$
$$100{,}25 \cdot t_d = 72 \cdot t_{dp} + 28{,}25 \cdot t_{dz},$$
$$t_d = 0{,}718 \cdot t_{dp} + 0{,}282 \cdot t_{dz}.$$

Um die für das ganze Brikett geltende Durchschnittstemperatur zu ermitteln, sind also die Durchschnittstemperaturen von Platte und Zylinder nach Multiplikation mit den eben errechneten Zahlen zu addieren.

Bei dem tatsächlichen 7″ Salonformat (vgl. Abb. 2) hätte die Formel betragen

$$t_d = 0{,}715 \cdot t_{dp} + 0{,}285 \cdot t_{dz}.$$

Der Unterschied ist also nur ganz unwesentlich.

Für die beiden bisher bearbeiteten Beispiele $\alpha = 8$ und $\alpha = 400$ ist der Zeitverlauf der Durchschnittstemperatur auf Abb. 7 dargestellt.

Aus Seite 25 und 26 ging hervor, daß die von den zylindrischen Seitenflächen des Brikettstrangs ausgehende Abkühlung bei längerer Dauer auch in den plattenförmigen Teil übergreift und ihm zusätzlich Wärme entzieht. Bei $\alpha = 400$ beispielsweise war ermittelt worden, daß hierdurch t_m nach 2 Stunden um 2 bis 3 ° mehr erniedrigt worden war, als es der senkrecht zur Plattenoberfläche gerichtete Wärmefluß allein bewirkt hätte. Einer Senkung von t_m würde, wie aus einer Betrachtung der Abkühlungskurven hervorgeht, bei den für eine Korrektur in Betracht kommenden Zeitpunkten auch eine mindestens gleiche Senkung von t_d entsprechen. Wir dürfen also in Abb. 7 bei $z = 2$ Stunden t_d um mindestens ca. 2° niedriger ansetzen; also 21,2° anstatt 23,2°, wie rein rechnerisch durch Addition ermittelt. Es entstehen so die etwas stärker geneigten Kurven, die die namentlich bei gutem Wärmeübergang auffällig zögernde Annäherung an die 20°-Abszisse berichtigen.

Die Korrektur wurde nur bis zu einer Kühldauer von ca. 2 Stunden ausgeführt, da längere Kühlzeiten praktisch nicht in Betracht kommen.

Die oben erwähnte Berechnung des Abkühlungsverlaufes einer Platte von 18 cm Dicke hat folgende praktische Bedeutung. Ein in Abb. 11 dargestellter einreihiger Stapel, durch aufeinandergelegte Brikettwürfe hergestellt, hat annähernd die Form einer unendlich langen und hohen Platte von 18 cm Stärke. Wie aus Abb. 12 hervorgeht, würde erst nach 40 Stunden die Temperatur der Plattenachse auf 23,9°, und die Durchschnittstemperatur auf 22,5° gesunken sein.

Tatsächlich erzeugen die gewölbten Seiten eine stärkere Abkühlung, immerhin zeigt das Beispiel, welch lange Zeit ungefähr erforderlich ist, um einen solchen einreihigen Stapel abzukühlen.

Abb. 12 zeigt ferner den Abkühlverlauf einer Platte von 1 m Stärke. Der Fall könnte praktisch in einem Stapel, etwa wie in Abb. 13 dargestellt, eintreten, und gilt unter der Annahme, daß der Stapel massiv aus Brikettmasse besteht. Tatsächlich befindet sich in den von den Wölbungen gebildeten Kanälen atmosphärische Luft. Solange sich diese nicht

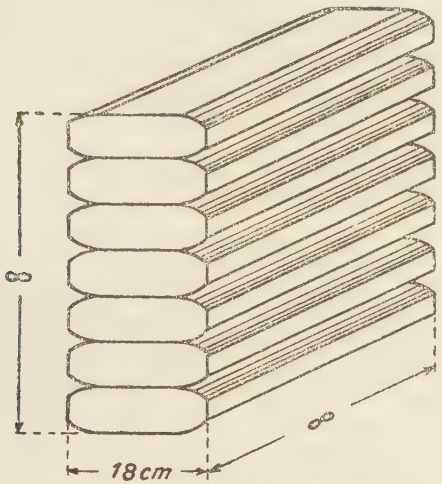

Abb. 11. Einreihiger Brikettstapel.

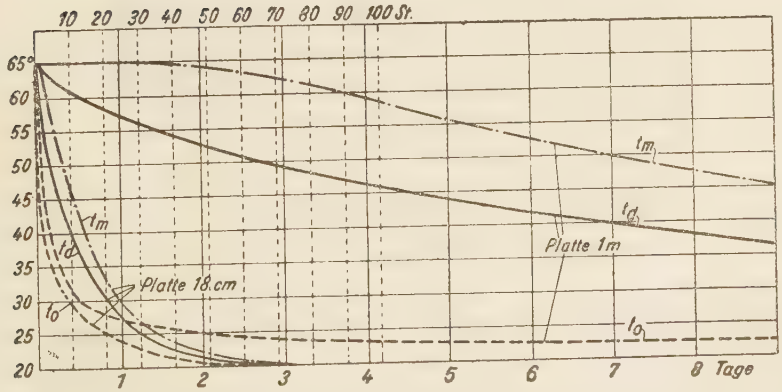

Abb. 12. Temperatur-Zeitkurven während der Abkühlung einer 18 cm und einer 1 m starken Brikettplatte in ruhender Luft ($\alpha = 8$).

in Bewegung setzt, hindert sie die Abkühlung, da sie eine noch schlechtere Wärmeleitzahl ($\lambda = 0{,}02$) als die Brikettsubstanz hat, und da der jeweilige Wärmeübergang vom Brikett auf Luft und umgekehrt gering ist. Praktisch wird natürlich stets eine Konvektion der Wärme durch die Luft hinzutreten, deren Einfluß nicht bestimmt werden kann; immerhin gibt Abb. 12 ein anschauliches Bild von der außerordentlich langsamen Abkühlung eines

nicht durchlüfteten Brikettstapels oder einer dicht gelagerten Masse von Braunkohlenstaub.[11])

Es war bisher der Brikettstrang hinsichtlich der Abkühlung als ein Ganzes betrachtet worden. Eine Zerlegung in einzelne Briketts und deren gesonderte Kühlung wird praktisch nicht in Frage kommen, namentlich, wenn eine gesetzte Verladung beabsichtigt ist. Immerhin kann geschätzt werden, in welchem Maße die Abkühlungsgeschwindigkeit eines einzelnen Salonsteines gegenüber dem im Brikettstrang liegenden beschleunigt ist.

Die Gesetze der Abkühlung des Prismas stehen in der handlichen Form, wie die der Platte und des Zylinders, nicht zur Verfügung. Lediglich

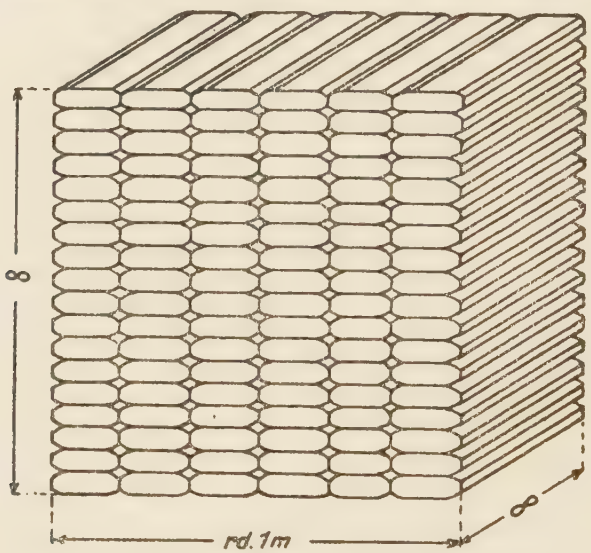

Abb. 13. Brikettstapel von 1 m Stärke.

der Abkühlverlauf der Längsachse (also t_m) eines unendlich langen quadratischen Balkens kann aus einer von Williamson und und Adams[12]) gegebenen Zahlentafel und dem dazugehörigen Schaubild zum Vergleich herangezogen werden. Diese Temperatur-Zeitkurve liegt dicht über derjenigen für die Längsachse eines unendlich langen Zylinders

[11]) In einem solchen Stapel wurden Temperaturmessungen zur Bestimmung der Durchschnittstemperatur beim Austritt aus der Presse vorgenommen. Siehe S. 108. Die Messungen wurden 48 Stunden lang ausgeführt. Die Temperatur in der Mitte fiel innerhalb dieser Zeit von 68° auf 59°. Es fand also Abkühlung durch die die horizontalen Kanäle bestreichende Luft statt.

[12]) Williamson und Adams, a. a. O., Seite 99. Vgl. hierüber auch Gröber, Z. d. V. d. I. 1925, S. 710, 711.

vom gleichen Durchmesser. Über den uns am meisten interessierenden jeweiligen Wärmeverlust und den Verlauf der Durchschnittstemperatur ist nichts bekannt. Um aber trotzdem über die Abkühlungsgeschwindigkeit des hier zu betrachtenden Prismas mit dem ungefähren Querschnitt 60 · 45 mm eine praktische Vorstellung zu erhalten, kann man annehmen, daß es in bezug auf den Verlauf der Durchschnittstemperatur dem Querschnitt eines Zylinders von 60 mm Durchmesser nahe kommt. Man hätte also die t_d-Kurven der Abb. 6 und 7 zu vergleichen, um den Unterschied in der Abkühlung eines einzelnen Steines gegenüber dem im Brikettstrang eingeschlossenen zu beurteilen. Dieser Unterschied ist geringer, als man allgemein annehmen sollte.

III. Die Faktoren der abklingenden Temperaturverteilung am 7" Salonbrikett.

1. Das Raumgewicht.

Das Raumgewicht γ ist in den Gesetzen der abklingenden Temperaturen ein Faktor der Kenngröße N.

$$N = \frac{\lambda \cdot z}{c \cdot \gamma \cdot H^2} = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma \cdot H^2} \cdot z.$$

Ein größeres γ verkleinert N. Da im Berechnungsgang die Formel in folgender Umformung angewendet wird,

$$z = N : \frac{\lambda}{c \cdot \gamma \cdot H^2} = N \cdot \frac{c \cdot \gamma \cdot H^2}{\lambda},$$

ist ersichtlich, daß bei sonst gleichbleibenden anderen Faktoren eine Vergrößerung des Wertes von γ das Eintreten eines bestimmten Abkühlungszustandes verzögert. Ein Brikett mit geringem Raumgewicht kühlt also schneller ab. Physikalisch ist dies dadurch zu erklären, daß von zwei Körpern gleichen Volumens derjenige größerer Masse einen größeren Wärmeüberschuß ($W = T_c \cdot c \cdot V \cdot \gamma$) hat, und bei sonst gleichen Abkühlverhältnissen zur Abgabe dieser Wärmemenge eine längere Zeit benötigt.

Die Auswirkung ist jedoch gering und spielt praktisch nur eine kleine Rolle. Abbildung 14 zeigt den Abkühlverlauf der Platte für $\gamma = 1100$ und 1200 bei den beiden bisher betrachteten Grenzwerten der WÜZ $\alpha = 8$ und $\alpha = 400$, und es geht daraus hervor, daß der Einfluß der Größe des Raumgewichts innerhalb dieser angenommenen und für die Praxis in den meisten Fällen zutreffenden Grenzen ($\gamma = 1100$ bis 1200) recht gering ist.

Da aus der Beobachtung des Abkühlverlaufes Schlüsse auf die Größe der Wärmeleitzahl gezogen werden sollten, war es nötig, das Raumgewicht der untersuchten Briketts praktisch zu bestimmen. Die Volumen-

bestimmung durch Wasserverdrängung im geeichten Meßglas war hierzu ausreichend. Die Steine wurden ein wenig benetzt, um Luftblasen beim

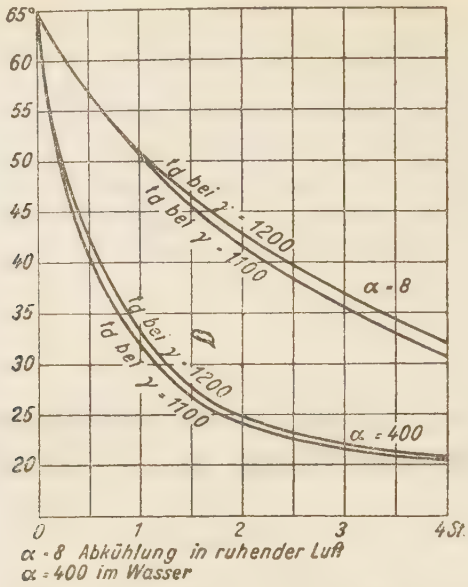

Abb. 14. Einfluß des Raumgewichts auf die Abkühlung der Brikettplatte bei $\alpha = 8$ und $\alpha = 400$.

Eintauchen zu vermeiden. Daß Wasser in meßbarer Größe in den Brikettkörper eindrang, wurde nicht wahrgenommen. Es fanden innerhalb 14 Tagen 15 Messungen statt. Der kleinste Wert war $\gamma = 1123$, der größte $\gamma = 1180$. Mit dem mittleren Wert $\gamma = 1150$ soll ständig gerechnet werden.

2. Die Höhe des Briketts.

In den Gesetzen wurde die halbe Stärke der Brikettplatte bez. der Radius der Halbzylinder mit H bezeichnet. Die Höhe des Briketts oder des Brikettstranges ist demnach 2 H (vgl. Abb. 1).

H ist in beiden Kenngrößen vertreten.

$$M = \frac{\alpha \cdot H}{\lambda}$$

$$N = \frac{\lambda \cdot z}{c \cdot \gamma \cdot H^2}; \quad z = N \cdot \frac{c \cdot \gamma \cdot H^2}{\lambda}.$$

Ein Anwachsen von H hat eine verhältnisgleiche zahlenmäßige Vergrößerung der Kenngröße M zur Folge. Auf den Schaubildern würde eine reine Zunahme von M bei gleichbleibendem N eine — bei der logarithmischen Teilung der Abszisse zwar geringe — Abnahme der Temperaturquotienten

zur Folge haben. Dies widerspricht dem Gefühl, denn eine stärkere Platte und ein dickerer Zylinder kühlen zweifellos langsamer ab, als schwache. Praktisch kommt dieser Widerspruch auch nicht zur Geltung, denn jede Vergrößerung von H erzeugt auch eine starke Verminderung der Kenngröße N und eine in der zweiten Potenz erfolgende Zunahme der Abkühlungsdauer. In welchem Ausmaß die Abkühlung bei großer Stärke des Körpers verzögert werden kann, zeigte die Abb. 12.

Die Höhe der Briketts beträgt im Fabrikationsgang zwischen 57 und 63 mm. Demgemäß

$$H = 0{,}0285 \text{ bis } 0{,}0315 \text{ m.}$$

Abb. 15 zeigt die t_d-Kurven der Platte für diese Werte. Der Einfluß der Briketthöhe auf die Abkühlungsgeschwindigkeit ist bereits fühlbar.

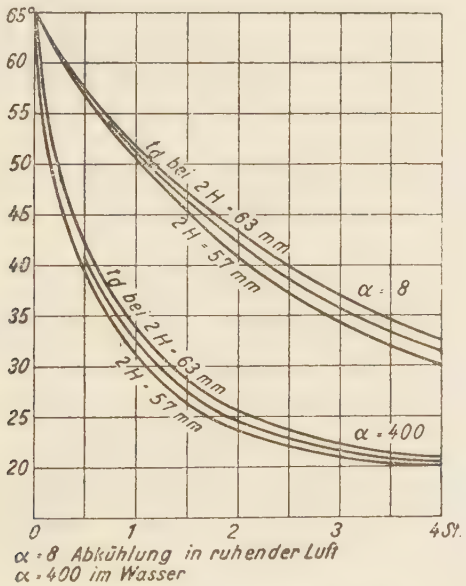

Abb. 15. Einfluß der Briketthöhe auf die Abkühlung der Brikettplatte bei $\alpha = 8$ und $\alpha = 400$.

Bei der heute meist üblichen Kühldauer von ca. ½ Stunde während des Vorschubs in der Kühlrinne kommt ein um 6 mm höheres Brikett mit einer annähernd 1 ° höheren Gesamttemperatur zur Verladung.

Bei den auf einem Niederlausitzer Werk durchgeführten Versuchen schwankte die Höhe der Steine zwischen 60 und 62 mm.

3. Die spezifische Wärme.

Der für die spezifische Wärme c des Briketts einzusetzende Zahlenwert steht als Faktor der Kenngröße

$$N = \frac{\lambda \cdot z}{c \cdot \gamma \cdot H^2}$$

an gleicher Stelle wie das Raumgewicht γ, und das dort grundsätzlich Gesagte ist auch hier gültig. Die in Betracht kommenden Zahlenwerte für c liegen jedoch in einem weit größeren Bereich verstreut, so daß auch ein stärkeres Abweichen der Abkühlungskurven voneinander eintritt, wenn der größte und kleinste durch Messungen festgestellte Zahlenwert in die Gesetze eingeführt wird.

Eine Zusammenstellung der in den beiden letzten Jahrzehnten ermittelten Werte der spezifischen Wärme verschiedener Forscher gaben Burckhardt und Fritzsche am Eingang ihrer „Bestimmung der spezifischen Wärme von Braunkohlen“ [13]). Die früher meist benutzten Zahlenwerte (etwa 0,3) liegen nach diesen genau durchgeführten Untersuchungen zu niedrig, und wir werden mehrfach aus dem Schrifttum heranzuziehende Berechnungen durch Einsatz höherer Werte von c umzurechnen haben.

Der größte von Burckhardt und Fritzsche ermittelte Zahlenwert der spezifischen Wärme der wasserfreien Kohle ist

$$c_0 = 0{,}4678 \text{ (Borna)},$$

der kleinste

$$c_0 = 0{,}3220 \text{ (Oberbayern)}.$$

Das Mittel daraus, sowie das aus den 26 gegebenen Untersuchungswerten ist

$$c_0 = 0{,}4.$$

Bei einem mittleren Wassergehalt des Briketts von 15 % beträgt dann

$$c = 0{,}4 \cdot 0{,}85 + 0{,}15 \cdot 1 = 0{,}49.$$

Würde man, um die für Briketts praktisch noch möglichen Grenzwerte zu erhalten, den kleinsten Wert von c_0 für eine Preßkohle mit 12 % Wasser, den größten für einen Wassergehalt von 18 % zugrunde legen, so erhält man die Grenzwerte

$$c = 0{,}322 \cdot 0{,}88 + 0{,}12 = 0{,}403,$$
$$c = 0{,}468 \cdot 0{,}82 + 0{,}18 = 0{,}564.$$

Nimmt man an, daß auf einem Werke die spezifische Wärme der wasserfreien Brikettsubstanz (z. B. $c_0 = 0{,}38$) konstant ist, so würde der Zahlenwert für c wegen des möglicherweise zwischen 12 und 18 % wechselnden Wassergehaltes sich in folgenden Grenzen halten:

$$c = 0{,}38 \cdot 0{,}88 + 0{,}12 = 0{,}454,$$
$$c = 0{,}38 \cdot 0{,}82 + 0{,}18 = 0{,}492.$$

---

[13]) Braunkohlenarchiv 1927, Heft 17, S. 20.

Die Abb. 16 zeigt den Verlauf der Abkühlungskurven der Platte für die oben angegebenen Grenzwerte von c. Die Betrachtung der beiden äußeren Kurven zeigt, daß ein Brikett mit einer geringen spezifischen Wärme schneller abkühlt, und zwar beträgt bei Abkühlung in ruhender Luft ($\alpha = 8$) der Unterschied der Durchschnittstemperaturen nach ½ Stunde bereits 3 °.

Auf dem Werk, auf dem die Untersuchungen ausgeführt wurden, war der Wassergehalt zwischen 12,8 und 14,9 % konstant, so daß die spezifische Wärme unter Annahme unveränderter Preßkohlenbestandteile gleichbleibend angenommen werden kann. Jedoch mußte die spezifische Wärme

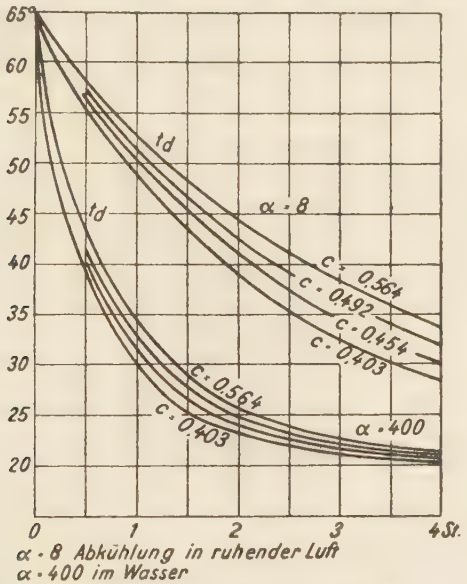

Abb. 16. Einfluß der spezifischen Wärme auf die Abkühlung der Brikettplatte bei $\alpha = 8$ und $\alpha = 400$.

der Briketts auf diesem Werk bestimmt werden, um die Anzahl der unbestimmten Faktoren, die die Abkühlung beeinflussen, möglichst einzuschränken.

Vorversuche mit Mischkalorimetern ergaben keine günstigen Resultate. Kleine Brikettstücke haben die Neigung, auf dem Wasser zu schwimmen; bei Stücken von 4 bis 5 cm Durchmesser muß man mit mindestens 25 Minuten Dauer rechnen, bis der Wärmeüberschuß der Kohle vom Wasser vollständig aufgenommen worden ist. In diesem Zeitraum ist aber bereits ein Verlust der Wärme des Wassers und der Gefäßwandung an die Um-

gebung eingetreten, der schlecht durch Korrekturen zu berichtigen ist [14]).

Es wurde daher ein Eiskalorimeter hergestellt (Abb. 17), dessen Abmessungen groß genug gewählt wurden, um auch mittlere Stücke untersuchen zu können. Das Kalorimeter sollte nämlich zugleich zur Ermittlung des Wärmeinhaltes und der Durchschnittstemperatur der aus der Presse austretenden Briketts verwendet werden, wobei die Untersuchungen durch weitgehende Zerkleinerung ungenau geworden wären.

Die Versuche mußten im Sommer bei einer Außentemperatur von ca. 20 ° vorgenommen werden, daher wurde die Außenwandung des Umhüllungsgefäßes mit starkem Filz isoliert. Bei einem Vorversuch wurde auch das Innengefäß nur mit Eis gepackt. Nach 5 bis 6 Stunden kamen die ersten Tropfen aus dem Abflußröhrchen zum Vorschein. Beim Öffnen des Kalorimeters zeigten sich die Stücke des Innengefäßes zum größten

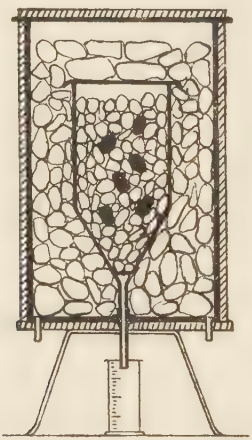

Abb. 17. Eiskalorimeter.

Teil noch scharfkantig wie beim Einlegen; jedoch waren sie an der Berührung mit der Gefäßwandung etwas geschmolzen. Dies rührte davon her, daß in der äußeren Packung einige Lücken entstanden und dort geringe Wärmebeträge durch Strahlung von der äußeren Wandung auf die innere übertragen worden waren. Man mußte also die Größe der Brikettstücke so wählen, daß eine vollständige Abkühlung bis auf 0 ° C in 4 bis 5 Stunden möglich war. Dies ließ sich an Hand der Abkühlungsgesetze

[14]) Baudenbacher, Braunkohle 1921/22, S. 433, verwendete ein Ölbad zur Isolierung des Mischgefäßes. Da aber der Wärmeübergang an eine Flüssigkeit bedeutend größer ist (bei Öl $\alpha =$ ca. 300 bis 500), als an Luft, so ging hierdurch noch mehr Wärme verloren, als bei Isolierung durch Luftschicht.

bestimmen. Für Kugeln von 6 cm Durchmesser läßt sich berechnen [15]), daß diese selbst bei einer niedrig angenommenen WÜZ $\alpha = 7{,}5$ nach 4½ Stunden bis ins Zentrum die Temperatur der Umgebung angenommen haben.

Die zur Bestimmung der spezifischen Wärme benutzten Brikettproben waren nur 2 bis 3 cm stark, um einer restlosen Vorwärmung im Wärmeschrank sicher zu sein. Sie wurden mehr als 24 Stunden auf $t = 85°$ erwärmt, besonders während der letzten Stunden bei konstant gehaltener Temperatur. Es war nicht möglich, die Proben vor dem Einlegen in das Kalorimeter zu wägen, ohne daß sie dabei einen Teil ihrer Wärme verloren hätten, denn zu einer genauen Wägung war es erforderlich, sie 10 Minuten im Exsikkator zu trocknen. Andererseits konnte auch das vor dem Einlegen in den Wärmeschrank ermittelte Gewicht nicht zur Rechnung dienen, da die Proben während des Erwärmens an Gewicht verloren. Es wurde daher zur Ermittlung des Gewichtes G der erwärmten Proben folgendermaßen verfahren:

Man legte mehrere Proben, z. B. I, II und III (Versuch IIa, S. 103), in Papierschalen in den Trockenschrank ein und bestimmte von Zeit zu Zeit das Gewicht. Der Gewichtsverlust der Proben durch Wasserverdampfung war jedesmal annähernd verhältnisgleich. Bei Versuch II betrug er in den ersten 19 Stunden 8,57 %, 8,66 % und 8,71 %; in den nächsten 8 Stunden 2,11 %, 2,03 % und 2,10 %; in den nächsten 13 Stunden 0,60 %, 0,61 % und 0,63 %. Nach der letzten Wägung wurden die Proben wieder ca. 5 Stunden lang erwärmt, sodaß man einer gleichmäßigen Temperatur sicher sein könnte. Zum Einlegen in das zur Füllung vorbereitete Kalorimeter direkt aus dem Wärmeschrank wurden nun nur die Stücke der Proben I und II benutzt, die Vergleichsprobe III wurde lediglich gewogen und ihr Gewichtsverlust während der letzten Erwärmung (0,1944 %) anteilig auf die beiden anderen Proben I und II übertragen. Ein Blick auf die Zahlenergebnisse zeigt, daß dieses Verfahren im Hinblick auf Genauig-

---

[15]) Kenngrößen:

$$M = \frac{\alpha \,.\, R}{\lambda} = \frac{7{,}5 \,.\, 0{,}03}{0{,}23} = 0{,}98\,;$$

$$N = \frac{\lambda \,.\, z}{c \,.\, \gamma \,.\, R^2} = \frac{0{,}23}{0{,}49 \,.\, 1150 \,.\, 0{,}0009} \,.\, z = 0{,}454 \,.\, z.$$

Aus dem Schaubild für die abklingende Temperaturverteilung der Kugel (Gröber, Wärmeübertragung, a. a. O. S. 37, sowie Z. d. V. d. I. 1925, S. 707, Abb. 2) wird festgestellt, daß der Temperaturquotient $\frac{T_m}{T_c}$ dann den Zahlenwert 0 hat, wenn die Kenngröße N (bei Gröber $\frac{a \,.\, t}{R^2}$) sich zwischen 1,0 und 2,5, etwa bei 2,0 befindet. Es ist also $N = 2{,}0 = 0{,}454 \,.\, z$. Demnach $z = 4{,}4$ Stunden. Ist $\frac{T_m}{T_c} = 0$, so ist die Temperatur des Kugelmittelpunktes $= 0$ und damit auch kein Wärmeüberschuß mehr vorhanden.

keit der anderen Messungen — Temperatur und abfließende Wassermenge — genügend genau ist. Durch Gleichsetzung der durch Schmelzwasser von A ccm nachgewiesenen Wärmemenge mit der durch die Kohlenproben dem Kalorimeter übergebenen Wärmemenge erhält man einen Zahlenwert für die spezifische Wärme c.

$$G \cdot t \cdot c = A \cdot 80{,}1 \text{ cal}$$

$$c = \frac{A}{G \cdot t} \cdot 80{,}1 \cdot$$

Dieser muß auf den Zahlenwert c_0 der wasserfreien Brikettsubstanz umgerechnet werden. Dabei wurde als Wassergehalt der an der Vergleichsprobe (III) durch Analyse ermittelte eingesetzt.

An den in Eis gekühlten Brikettstücken wurde bei den einzelnen Versuchen eine geringe Feuchtigkeitszunahme bis 0,5 % je nach der Größe der verwendeten Stücke festgestellt. Jedoch fühlten sie sich vollkommen trocken an und waren frei von außen anhaftenden Tropfen. Die Wasseraufnahme wurde durch Rückwägung ermittelt und zur Korrektur der Schmelzwassermenge benutzt.

Die spezifische Wärme der wasserfreien Brikettsubstanz wurde durch Versuch IIa zu

$$c_0 = 0{,}379$$

ermittelt. Zwei weitere Versuche gleicher Anordnung ergaben

$$c_0 = 0{,}376 \text{ und } c_0 = 0{,}387,$$

das Mittel ist

$$c_0 = 0{,}3807.$$

Der mittlere Wassergehalt der Salonbriketts betrug während der Ausführung der Versuche nach den auf diesem Werk dreimal täglich ausgeführten Analysen 13,76 %; der niedrigste Wert war 12,8 %, der höchste 14,9 %. Wegen der innerhalb dieser Grenzen geringen Schwankung soll bei der Auswertung der Versuche mit dem mittleren Wert ständig gerechnet werden.

$$c = 0{,}3807 \cdot 0{,}8624 + 0{,}1376 = 0{,}466.$$

Zur Prüfung des Kalorimeters diente die Bestimmung der spezifischen Wärme einiger gußeiserner Gewichte zu $c = 0{,}125$. Dieser Wert stimmt mit den physikalischen Tabellen überein. (c Gußeisen = 0,12 bis 0,14.)

4. Die Wärmeleitzahl.

Die Wärmeleitzahl λ ist in beiden Kenngrößen vertreten.

$$M = \frac{\alpha \cdot H}{\lambda},$$

$$N = \frac{\lambda \cdot z}{c \cdot \gamma \cdot H^2}; \quad z = N \cdot \frac{c \cdot \gamma \cdot H^2}{\lambda}.$$

Ihre Stellung in der Formel für M scheint, wie dies auch bei H festgestellt wurde, der praktischen Erfahrung zu widersprechen. Eine Vergrößerung von λ würde nach den Schaubildern in demjenigen Bereich von M, in dem die Kurven gegen die M-Achse geneigt sind, bei gleichbleibendem N eine Erhöhung der abzulesenden Temperaturen zur Folge haben. Da die Vergrößerung von λ jedoch zu gleicher Zeit auf N und z einwirkt, wird dieser scheinbare Widerspruch überragt und in dem rechten Teil der Schaubilder, wo die Kurven nahezu parallel zur M-Achse verlaufen, ausgeschaltet. Immerhin wird der Einfluß einer Veränderung der Wärmeleitzahl etwas gehemmt, solange wir uns in den zwei linken Dritteln der Schaubilder befinden und kommt erst bei einem großen Wert von M voll zur Geltung. Ein solcher Wert von M wird durch einen großen Wert von α erzielt. Eine gute Wärmeleitfähigkeit des abkühlenden Körpers wird also bei gutem Wärmeübergang zu größerer Bedeutung kommen als bei schlechtem.

Die Wärmeleitfähigkeit von Braunkohle und Braunkohlenbriketts war bei Inangriffnahme der Berechnungen zahlenmäßig nicht bekannt. Folgende Werte konnten aus physikalischen Tabellen zum Vergleich herangezogen werden. Es ist jedoch zu beachten, „daß diese Angaben der Wärmeleitzahlen äußerst unsicher sind, zum Beispiel die Angabe für Steinkohle $\lambda = 0{,}12$ bis 0,15 besagt nur, daß solche Angaben in der Praxis gefunden werden“ [16]). Aus den Zusammenstellungen von Gröber und ten Bosch [17]) werden folgende Werte entnommen:

Holz, je nach Art und Faserrichtung	0,12 bis 0,37
Koksstaub	0,12
Steinkohle	0,12 bis 0,15
Gaskohle	3,0 bis 3,42
Erde	0,12 bis 0,58
Quarzsand	0,3 bis 0,5
Wasser	0,5.

Die für Gaskohle gegebene Zahl liegt weit abseits der für Braunkohle möglichen Werte, wie aus den folgenden Untersuchungen mit Sicherheit hervorgeht.

Die hier angeführten Zahlenwerte gelten für einen Temperaturbereich von 20 ° bis 60 °, in dem sich die zu betrachtenden Abkühlungsvorgänge hauptsächlich abspielen.

Auf eine Annäherung des Zahlenwertes von λ an denjenigen von Wasser mit zunehmendem Wassergehalt der Briketts, wie dies bei der spezifischen Wärme der Fall ist, kann nicht ohne Bedenken geschlossen werden. Die Wärmeleitzahl beim trockenen Ziegel beträgt $\lambda = 0{,}3$, beim

---

[16]) Gröber, Wärmeübertragung a. a. O., Seite 185.

[17]) ten Bosch, a. a. O., S. 47 bis 52.

feuchten 0,9; bei trockenem Sand 0,28 und bei feuchtem 0,97. Der Zahlenwert für Wasser liegt dazwischen, 0,5 [18]).

Nach den oben gegebenen Zahlen konnte für Braunkohle als unterste Grenze der Wert an Steinkohle $\lambda = 0{,}12$ bis 0,15, als oberste Grenze der für Holz, parallel zur Faser $\lambda = 0{,}37$, in Betracht kommen.

Die Abb. 18 zeigt den Einfluß der Wärmeleitzahl in den Grenzen $\lambda = 0{,}15$ bis 0,31. Bei gutem Wärmeübergang reagieren die Kurven besonders auf Veränderungen der Wärmeleitzahl.

Es ist nun zum Verständnis des zur Bestimmung der Wärmeleitzahl angewendeten Verfahrens notwendig, einige Bemerkungen über die Wärmeübergangszahl vorauszuschicken. Der Verlauf der Temperaturkurven ist nämlich bei gutem Wärmeübergang unempfindlich

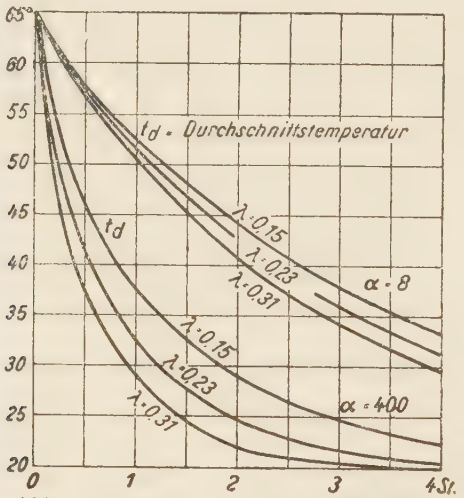

Abb. 18. Einfluß des Wärmeleitvermögens auf die Abkühlung der Brikettplatte.

gegen Veränderungen des Zahlenwertes der WÜZ. Dies ist schon in den Schaubildern aus dem annähernd parallelen Verlauf der Kurven zwischen $M = 50$ und ∞ ersichtlich und wird durch Abb. 19 veranschaulicht. Bei dem hier gebrauchten Zahlenwert

$$\alpha = 400 \quad \text{ist} \quad M = 52,$$
$$\text{bei } \alpha = 600 \text{ wäre } M = 78{,}2,$$
$$\text{„ } \alpha = \infty \quad \text{„} \quad M = \infty.$$

Der Verlauf der t_m-Kurven für $\alpha = 400$ und für $\alpha = \infty$ ist auf Abb. 19 ersichtlich. Die t_m-Kurve für $\alpha = 600$ konnte nicht mit dargestellt werden; ihre größte Abweichung von der Kurve für $\alpha = 400$ beträgt 0,1 ° [19]).

---

[18]) ten Bosch a. a. O., S. 44.

[19]) Die Schaubilder Abb. 3 und 4 sind nach den Zahlentafeln Gröbers. Z. d. V. D. I. 1925, S. 710, gezeichnet. Es sind dort die Zahlenwerte für $M = 50$ und

Für einen Abkühlungsvorgang, bei dem der Zahlenwert der WÜZ größer als ca. 400 einzusetzen ist, ist also der genaue Wert von α praktisch gleichgültig. Wie später angegeben wird (S. 77), beträgt bei Abkühlung oder Erwärmung eines Körpers im Wasser

$$\alpha = 400 \text{ bis } 3000.$$

Welcher Wert herausgegriffen wird, ist also für unsere, rein praktischen Zwecken dienenden Untersuchungen bedeutungslos; die Wärmeübergangs-

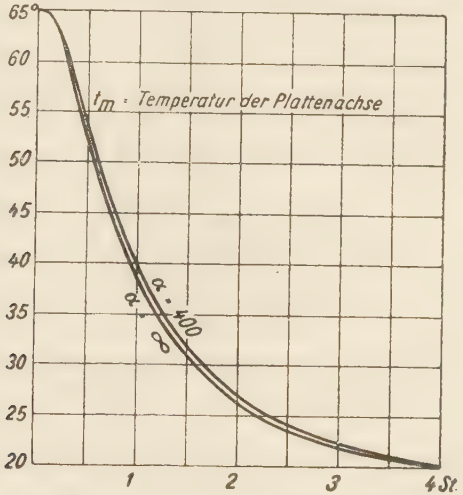

Abb. 19. Temperatur-Zeitkurve der Achse der Brikettplatte bei gutem Wärmeübergang.

zahl α ist als Unbekannte ausgeschieden. Wenn daher an einer Brikettsorte die Höhe 2 H, spezifische Wärme c und das Raumgewicht γ bekannt sind, und wird ferner die Temperatur zu Beginn t_a, sowie diejenige des umgebenden Wassers t_b gemessen, so kann aus der graphischen Registrierung des Abkühlverlaufes ein Schluß auf den Zahlenwert der Wärmeleitfähigkeit λ gezogen werden.

Die Gesetze der abklingenden Temperaturverteilung gelten für die Erwärmung eines Körpers in gleicher Weise wie für die Abkühlung. Der Einsatz der Anfangstemperatur t_a kann an Briketts, die mehrere Tage einer bestimmten Zimmertemperatur ausgesetzt waren, genauer geschehen, als wenn sie künstlich vorgewärmt werden. Daher wurden diese Versuche so ausgeführt, daß der Verlauf der Erwärmung des Brikettwurfes beobachtet wurde, wenn er in ein heißes Wasserbad von ca. 60 ° eingetaucht

---

$M = \infty$ gegeben. Dazwischen wurden die Kurven bei der Vergrößerung der Schaubilder freihändig entworfen. Es unterliegen also die für $M = 78$ entnommenen Zahlenwerte vielleicht einer geringen Ungenauigkeit, deren Einfluß jedoch auf unsere Untersuchungen ohne Bedeutung ist.

wurde. Die Temperatur des Wassers wurde während der allmählichen Erwärmung der Briketts konstant gehalten. Es wurden sieben gut aneinander haftende Salonbriketts fest zusammengebunden, wie Abb. 20 zeigt. Auch nach zweistündigem Aufenthalt im Wasser waren die Stempelflächen noch trocken. Außerdem hätte eine dünne Wasserschicht der Versuchsgenauigkeit nicht geschadet, da eine Konvektion der Wärme fast nicht

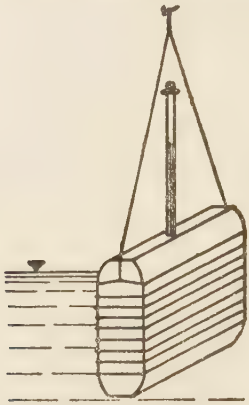

Abb. 20. Versuchsanordnung bei Abkühlung oder Erwärmung im Wasser.

stattfinden konnte. Zur Beobachtung des Temperaturverlaufes in der Achse der Brikettplatte diente ein Thermometer, das in ein Loch von 8 mm Durchmesser des mittleren Steines eingesteckt wurde. Es war in dem Loch etwas Bohrmehl belassen worden, um den Wärmeübergang gleich-

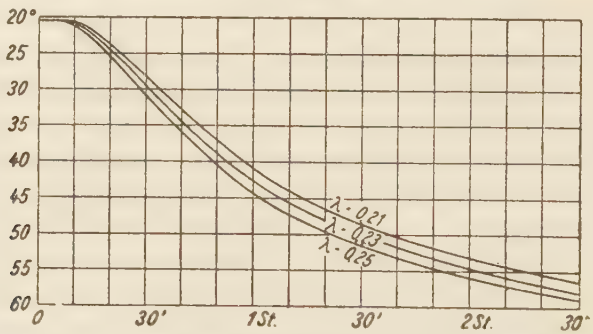

Abb. 21. Temperatur-Zeitkurven für die Achse der Brikettplatte bei Erwärmung im Wasser.

mäßiger zu gestalten. Das Loch war nur 80 mm tief gebohrt, um die von den unteren Wölbflächen ausgehende zusätzliche Einwirkung zu verzögern. Der Einfluß der oberen Wölbflächen wurde dadurch ausgeschaltet, daß der Brikettwurf nur bis etwa 2 cm vom oberen Rand in das Wasser eintauchte.

Auf Abb. 21 sind die Temperatur-Zeitkurven für $\lambda = 0{,}21$, 0,23 und 0,25 entworfen unter Berücksichtigung der auf diesem Werk bestimmten

spezifischen Wärme ($c = 0{,}466$), des Raumgewichts ($\gamma = 1150$), der Plattenstärke ($2\,H = 62$ mm), der Anfangstemperatur beim Versuch $t_a = 20{,}5\,°$ und der Wassertemperatur $t_a = 61\,°$. Die WÜZ war bei der Berechnung dieser Kurven zu $\alpha = 600$ eingesetzt worden. Es zeigte sich, daß die Versuchswerte mit der mit $\lambda = 0{,}23$ entworfenen Kurve in allen Teilen bis auf 0,2 ° übereinstimmten.

Der Versuch wurde zweimal mit einem anderen Brikettwurf wiederholt. Er hatte bis auf ganz geringe Abweichungen von höchstens 0,4 ° den gleichen Verlauf. Eine 8 Wochen später ausgeführte Kontrolle ergab eine Temperaturkurve, die mehr auf $\lambda = 0{,}24$ hindeutete. Es wurden jedoch die größtenteils fertiggestellten Berechnungen unverändert mit $\lambda = 0{,}23$ belassen. Das letzte Ergebnis bedeutet für die am Schluß der Arbeit errechneten Abkühlungsmöglichkeiten einen gewissen Sicherheitsfaktor.

Gegen dieses Verfahren der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit läßt sich einwenden, daß die Messung infolge der Einführung des Thermometers ungenau ist. Das Thermometer besetzt eine kreisrunde Zone von 8 mm Durchmesser und nicht genau die Plattenachse. Infolge der guten Wärmeleitfähigkeit des Quecksilbers (5,4 bis 7,1) wird es die verschiedenen Temperaturen dieser Zone ausgleichen. Andererseits wird es aber auch ständig von der Temperatur der Plattenachse mitgespeist und erfordert zu seiner eigenen Erwärmung infolge des hohen Raumgewichtes (13 600) trotz geringerer spezifischen Wärme (0,033) selbst eine etwas größere Wärmemenge, als das gleichgroße Brikettvolumen benötigt hätte.

Es könnte die durch das Thermometerglas abgeleitete Wärme berücksichtigt werden. Die Wärmeleitzahl von Glas beträgt 0,4 bis 0,8, von Porzellan 0,9, ist also höher als die der Brikettsubstanz. Immerhin würde auch dieser Einfluß sich erst nach längerer Zeit bemerkbar machen, nachdem wesentliche Temperaturunterschiede zwischen dem zu erwärmenden Brikettkern und der Außenluft eingetreten sind.

Wie auf S. 26 gezeigt, macht sich der in Richtung der Brikettachse gerichtete Wärmefluß bei gutem Wärmeaustausch im Brikettmittelpunkt nach 1 bis 2 Stunden bemerkbar. Er kann also für die erste Stunde unberücksichtigt bleiben, zumal der Meßpunkt etwas nach oben verschoben worden war und die oberen gewölbten Flächen nicht in das Wasser eintauchten. Die Versuchskurven wichen nach zweistündiger Erwärmungsdauer um ½ bis 1 ° von den theoretisch für die Platte errechneten Werten ab.

Die Genauigkeit, mit der zuvor die spezifische Wärme der Brikettsubstanz ermittelt worden war, beeinflußte den hier gefundenen Wert der Wärmeleitfähigkeit. Auch mit einem anderen Wert von c wäre es möglich gewesen, eine rechnerisch ermittelte t_m-Kurve mit der Versuchskurve in Einklang zu bringen, und man hätte hierbei einen anderen Wert von λ

passend gefunden. Dies hätte jedoch dann zu Unstimmigkeiten bei der Angleichung der theoretischen Kurven an die Versuchskurven mit anderen Werten der WÜZ (in ruhender Luft, im Ventilatorstrom usw.) geführt und nichtpassende Werte von α ergeben. Da aber der gefundene Wert von λ einer Kontrolle durch die weiteren Versuche standhielt, wobei der Wert von α näherungsweise berechnet werden konnte, können wir mit ihm in den Abkühlgesetzen rechnen, ohne die gewonnenen Erkenntnisse zu gefährden.

Anmerkung. Durch Änderung der Versuchsanordnung, z. B. besonders für die Versuche hergestellte 8″ oder 10″ Brikettplatten, Verwendung von Thermoelementen mit kleinem Durchmesser usw. würde es möglich sein, die Bestimmung von λ genauer zu gestalten. Auch Vergleichsversuche mit Stoffen von bereits bekannter Wärmeleitfähigkeit unter Anwendung der gleichen Körperformen könnten angestellt werden. Verfasser hatte daran gedacht, den Erwärmungs- oder Abkühlungsverlauf eines dem untersuchten Brikettwurf in den Abmessungen entsprechenden eisernen Stempelstückes zum Vergleich heranzuziehen. Es ist jedoch die Wärmeleitzahl von Eisen ($\lambda = 30$ bis 55) unbestimmt, und die Beschaffung von reinem Kupfer wäre zu teuer geworden.

5. Die Überschußtemperatur.

Die Überschußtemperatur ist die Differenz zwischen der Temperatur, die der Körper zu Beginn der Abkühlung hat und derjenigen am Ende der Abkühlung nach Angleichung an die Umgebung. Die absolute Höhe beider Wärmegrade ist bedeutungslos[20]); es ist also für den Verlauf der Abkühlung gleichgültig, ob beispielsweise von 65° auf 20° oder von 55° auf 10° abgekühlt wird. In beiden Fällen beträgt

$$T_c = t_a - t_b = 45^0.$$

Die Schaubilder zur zahlenmäßigen Auswertung der Gesetze der abklingenden Temperaturverteilung gestatten die Ablesung der Temperaturquotienten

$$\frac{T_o}{T_c}, \quad \frac{T_m}{T_c} \text{ und } \frac{T_d}{T_c}.$$

Sie geben die jeweiligen Überschußtemperaturen der Oberfläche, der Achse und des Durchschnittes als einen Bruchteil der anfänglichen Überschußtemperatur an. Die Ergebnisse T_o, T_d und T_m stehen also in einem linearen Verhältnis zu T_c.

Die zahlenmäßige Handhabung der Endtemperatur t_b in der obigen Gleichung für T_c ist einfach, indem die Temperatur der Umgebung für sie eingesetzt wird, die durch Messung leicht zu bestimmen ist. Größere Schwierigkeiten bot die Ermittlung der Anfangstemperatur t_a

[20]) Einen sehr geringen Einfluß hat die absolute Temperaturhöhe auf die durch Strahlung abgeführte Wärmemenge. Vgl. hierüber S. 74 ff.

und die Beantwortung der vorauszuschickenden Frage, ob man überhaupt von einer gleichmäßigen Temperaturhöhe über den ganzen Brikettquerschnitt ausgehen kann und in welcher Weise einer ungleichförmigen Temperaturverteilung im Brikett beim Austritt aus der Presse Rechnung zu tragen ist. Bei dieser Untersuchung müssen wir auf die Vorgänge in der Presse bei der Bildung des Briketts eingehen, soweit sie die Ursache der ungleichmäßigen Temperaturverteilung sind.

Einen wesentlichen Einfluß auf den Wärmegrad des entstehenden Briketts hat die Temperatur, mit der die Brikettierkohle in den Preßrumpf gelangt. Sie rührt von der Trocknung der Kohle her und hat beim Lauf durch das Kühlhaus eine mehr oder weniger starke Verminderung erfahren. Zwar ist bei den verschiedenen Korngrößen die Erwärmung und Abkühlung nicht ganz gleichmäßig, doch kann angenommen werden, daß sich diese geringen Ungleichheiten bei der Pressung und der darauffolgenden Abkühlung untereinander ausgleichen, so daß eine ungleichmäßige Temperaturverteilung, hervorgerufen durch die verschiedenen Korngrößen, nicht in Betracht gezogen werden soll.

Bei der Bildung des Briketts unterscheidet man zwischen einer sich über den ganzen Brikettquerschnitt erstreckenden Erwärmung der gesamten Masse, die als Kernerwärmung bezeichnet werden soll, und einer zusätzlichen Erwärmung der an die Außenflächen angrenzenden Zone. Diese sei Randerwärmung benannt.

Die Übung, Wärmemengen im Brikett im allgemeinen nicht durch Kalorienzahlen, sondern durch Temperaturgrade anzugeben, soll auch hier beibehalten werden. Z. B., es wird nicht gesagt werden: Die Kernerwärmung beträgt 4,2 kcal pro Brikett, da der Praktiker sich hieran kein anschauliches Bild machen kann, sondern es wird angegeben: Die Kernerwärmung beträgt $T_k = 17\,^\circ$. Damit soll gesagt sein: Die dem Brikett bei der Pressung übermittelte Wärmezufuhr erhöhte die Temperatur der Brikettierkohle um 17 °. Auch die Randerwärmung läßt sich auf diese Weise ausdrücken. Die Zahlenangabe $T_r = 4\,^\circ$ bedeutet z. B.: Der in der Randzone beim Austritt aus der Presse enthaltene Wärmeüberschuß über die Kernerwärmung würde, wenn auf den gesamten Brikettquerschnitt verteilt, eine zusätzliche Temperaturerhöhung um 4 ° bewirken.

Wird die Temperatur der Brikettierkohle beim Eintritt in den Preßkopf mit t_p bezeichnet, so ist die Gesamt- oder Durchschnittstemperatur eines Briketts beim Austritt aus der Presse

$$t_d = t_p + T_k + T_r,$$

oder unter Benutzung der auf einem Niederlausitzer Werk ermittelten Zahlenwerte ist

$$t_d = 50^\circ + 17^\circ + 4^\circ = 71^\circ.$$

Wir müssen zunächst auf die Entstehung der Kern- und Randerwärmung eingehen:

Die Verdichtung der vor dem Stempel befindlichen lockeren Kohle geschieht gleichmäßig über den Stempelquerschnitt. Sie erzeugt also Kernerwärmung. Dabei erhalten die Stirnflächen durch den Schlag des Stempels und die Gegenwirkung des Brikettstranges eine zusätzliche Erwärmung. Eine Sonderabkühlung der Stirnflächen findet nicht statt; die Auswirkung wird also eine allgemeine Erwärmung des Brikettstranges sein. Da es sich nur um geringe Beträge handelt, soll von einer gesonderten Betrachtung der Stirnflächenerwärmung abgesehen werden, und sie wird in unseren Untersuchungen als ein Teil der Kernerwärmung betrachtet.

Bereits im Arbeitsstück beginnt die Form sich um 1 bis 2 mm zu verengen, und der sich anschließende Buckel bedeutet eine weitere Verengung von 6 bis 10 mm. Der Stein erfährt also während der auf die Brikettbildung folgenden 5 bis 8 Umdrehungen der Presse eine von den Berührungsflächen mit der Form nach dem Innern zu gerichtete abermalige Pressung. Sie bewirkt eine weitere Erhöhung der Temperatur. Soweit diese das ganze Brikett betrifft, mag sie von der oben erwähnten Kernerwärmung nicht unterschieden werden, sondern soll in sie einbegriffen sein. Sollte der Druck auf das Brikett am Buckel jedoch besonders von den äußeren Schichten aufgenommen werden, so würden diese hierdurch eine zusätzliche Erwärmung erfahren, die den ersten Teil der Randerwärmung bildet. Zugleich mit dieser Randerwärmung durch Druck findet eine Erwärmung der Randzonen durch Wärmeleitung von der durch Reibung stark erwärmten Oberfläche des frisch gebildeten Steines nach dem Innern des Briketts statt. Wenn auch angenommen wird, daß das Brikett beim Passieren des Buckels noch plastisch ist, so erzeugt doch die Querschnittsverengung um 6 bis 12 % einen außerordentlichen gegenseitigen Druck zwischen Strang und Form, der sich in einer hohen Erwärmung der reibenden Flächen bis auf ungefähr 200 bis 300 ° auswirkt. Diese Temperaturhöhe ist durch Versuche nachgewiesen, von denen später die Rede sein wird.

Vom Buckel aus erweitert sich die Schwalbung um 2 bis 3 mm und das Brikett dehnt sich entsprechend aus. Da die Form durch das in den Bohrungen umlaufende Kühlwasser gekühlt wird und das Brikett eng umschließt, wird auch Wärme, vor allem ein Teil der Randwärme, wieder abgeführt. Dies wirkt sich dahin aus, daß die Temperatur der Oberfläche des Brikettstranges beim Austritt aus der Presse etwa auf 100 ° gesunken ist.

Über die Temperaturverteilung im Brikett bei der Bildung und beim Verlassen der Presse liegen bereits Untersuchungen und Äußerungen im fachmännischen Schrifttum vor. Sie dienten zwar

meist anderen Zwecken, wie dem hier vorliegenden, teils der Aufstellung von allgemeinen Wärmebilanzen der Brikettherstellung, teils der Erforschung der Entstehungsvorgänge des Briketts. Immerhin schien es geboten, sie der Vollständigkeit halber in den Kreis unserer Betrachtungen einzuschließen. Da sie z. T. weit einander abweichen, war es erforderlich, sie eingehend nachzuprüfen und möglichst untereinander und mit eigenen Untersuchungen in Einklang zu bringen, selbst auf die Gefahr hin, die Arbeit über den ursprünglichen Rahmen hinaus etwas zu erweitern.

Leuner[21]) hat an einer Brikettierkohle von ca 45 ° beim Eintritt in den Preßkopf folgende Zunahmen der Innentemperaturen festgestellt:

Salonbriketts		Industriebriketts	
Drehzahl der Presse p. Min.	Zunahme der Innentemperatur ° C	Drehzahl der Presse p. Min.	Zunahme der Innentemperatur ° C
80	11	86	1
90	6	90	4
100	10	100	8
110	6	111	7
120	8	120	5
130	8		
140	6		

Diese Messungen wurden durch Anbohren 30 mm tief mit vorgewärmten Schnellbohrern ausgeführt. Die außerordentlichen Schwankungen der Ergebnisse ohne Rücksicht auf die Umdrehungszahl lassen annehmen, daß die Genauigkeit der Messungen durch die geringe Einstecktiefe der Thermometer beeinträchtigt wurde. In den meisten Fällen scheint die Temperaturerhöhung zu gering gemessen worden zu sein.

Ein anderes Verfahren zur Bestimmung der Kern- und Randtemperaturen, im besonderen der Stärke der höher erhitzten Randzone, wandte Venator[22]) an. Er benutzte Stoffe mit bekanntem Schmelzpunkt und mischte diese in feinen Spänen dem die Zuführungswalze passierenden Strom der Brikettierkohle bei. Durch den Grad der Anschmelzung wurde die Temperatur beim Preßgang an derjenigen Stelle im Brikett offenbart, an der der Span eingebettet worden war. Die Späne von Zink (Schmelzpunkt 430 °) zeigten nirgends Spuren von Anschmelzung. Die Bleispäne (Schmelzpunkt ca. 320 °) waren angeschmolzen, soweit sie in unmittelbare

---

[21]) Braunkohle 1910/11, S. 341/342.

[22]) Bergdirektor Venator in Ramsdorf: Versuche und Beobachtungen aus dem Gebiete der Briketterzeugung. Jahrbuch für das Berg- und Hüttenwesen im Königreich Sachsen, Freiberg, Craz & Gerlach 1911, Abhandlungen S. 90 bis 112. Auszüge finden sich von Baudenbacher, Braunkohle 1925/26, S. 960, und Kegel, Braunkohle 1926/27, S. 389.

Berührung mit den Formteilen oder mit dem Stempel gekommen waren oder dicht unter solchen Berührungsflächen lagen. Im Innern der Briketts waren weder die Metallstücke, noch die Legierungen mit den Schmelzpunkten 115 °, 97 ° und 68 ° geschmolzen. Paraffin mit Schmelzpunkt 55 bis 56 °, in Stangenform verwendet, war lediglich flach gedrückt. Die Temperatur der Oberfläche des Brikettstranges beim Austritt aus der Presse gibt Venator zu 97 ° an. Es ist jedoch nicht ersichtlich, wie diese Messung ausgeführt worden ist. Bei der Berechnung des Wärmeinhaltes beim Austritt aus der Presse nimmt Venator die Randzonen 2 mm stark zu 97 ° an, danach entspricht die Randerwärmung einer Gesamterwärmung des Briketts um 3,9 °.[23])

Die Eintrittstemperatur der Preßkohle war bei Venator im Mittel 45 bis 46 °. Zur Bestimmung der Kerntemperaturen an frisch gepreßten Briketts wurden ebenfalls Messungen mit Thermometern ausgeführt, die in Bohrungen eingesetzt wurden. Der Durchschnitt der Kernerwärmung von 15 Versuchen betrug $T_k = 7{,}7$ °. Dabei wurde jedoch, wie aus den Abbildungen ersichtlich ist, das Salonbrikett z. T. quer angebohrt. Hieraus, und da Venator ferner Quecksilber zwischen Bohrlochwandung und Thermometer einfüllte, wird geschlossen, daß die Kernerwärmung um einige Grad zu niedrig gemessen wurde. Dies soll später an der Wärmebilanz Venators (S. 60) begründet werden.

Auch bei den Messungen, die Venator über die Kernerwärmung von verschieden stark gekühlter Kohle ausgeführt hat, und die in Brk. 1926/7, Seite 389 zitiert worden sind, fällt die geringe Kernerwärmung (6,5 ° bez. 4,5 °) auf. Es betrug:

Temperatur der Preßkohle t_p	58,0	47,0	27,0	16,0	6,0	3,0
Kernerwärmung T_k	6,5	4,5	16,5	17,0	22,5	18,0

Möglicherweise liegt jedoch hier ein Druckfehler vor, denn bei der graphischen Darstellung dieser Versuche hat Venator folgende Werte zu Grunde gelegt:

Temperatur der Preßkohle t_p	48,0	37,0	27,0	16.0	6,0	3,0
Kernerwärmung T_k	16,5	14,5	16,5	17,0	22,5	18,0

Demnach hätte die Kernerwärmung auch bei der warm verpreßten Kohle

[23]) Venator hat mit dieser Zahl (Seite A 95 seiner Abhandlung) nur die Randerwärmung (T_r) gemeint, und nicht, wie aus der Wiedergabe in Braunkohle 1926/27, S. 389 geschlossen werden könnte: Die Temperaturerhöhung im Brikett (T_k).

immer noch 15 ° betragen. Die Tatsache der stärkeren Erwärmung beim Verpressen kalter Kohle bleibt trotzdem bestehen.[24])

Gebhardt[25]) gibt die Kernerwärmung beim Preßvorgang zu 10 bis 15 °, die Kerntemperatur im Brikett demnach zu 50 bis 60 °, je nach der Temperatur der Brikettierkohle an.

Es liegt ferner eine theoretische Berechnung von Foos[26]) über die mutmaßliche Kern- und Randerwärmung bei der Bildung des Briketts vor. Für unsere Betrachtungen seien folgende Zahlenwerte übernommen:

Eine 7″ Salonpresse mit 90 Umdrehungen pro Minute und 90 Psi. hat bei der Bildung eines Briketts eine Pressenleistung von 4500 mkg. Davon werden für Leerlauf 15 % und für den Transport des Brikettstranges 10 % abgesetzt, so daß zur Bildung des Briketts 3440 mkg verbleiben. Foos nimmt sodann an, daß die gesamte vom Preßstempel ausgeübte mechanische Energie in Wärme umgesetzt wird. Man kann ihm dabei ohne Bedenken folgen, da eine Energieumsetzung anderer Art in nennenswertem Maße nicht stattfindet. Nach dem mechanischen Wärmeäquivalent entsprechen 3440 mkg = 8,04 kcal. Foos berechnet nun zunächst die Temperaturerhöhung für den Fall, daß diese Wärme über das gesamte Brikett verteilt würde und kommt bei Einsatz der spezifischen Wärme c = 0,38 zu einer allgemeinen Erwärmung um 42,6 °. Würden die errechneten 8,04 kcal dagegen lediglich zur Erwärmung eines Randes von 5 mm Dicke verbraucht, so würden sie diese Zone um 213 ° erhitzen können.

Die von Foos rechnerisch ermittelte Erwärmung liegt außerordentlich hoch. Durch Einsatz eines höheren Wertes der spezifischen Wärme wird das Resultat zwar etwas gemildert. Baudenbacher[27]) errechnet mit c = 0,58 auf diese Weise die mögliche Erwärmung zu 28,6 ° anstatt 42,6 °.

---

[24]) Es soll bei dieser Gelegenheit auf eine Unstimmigkeit in den Messungen von Venator hingewiesen werden, da sie von Baudenbacher in die „Beiträge zur Klärung der Brikettierung“ (Brk. 1925/26, S. 962) übernommen worden ist.
Es betrug beim Verlassen der Presse:

die Innentemperatur 53 °, die Oberflächentemperatur 97 °.

Auf dem Wagen angelangt:

die Innentemperatur 49 °, die Oberflächentemperatur 65 °.

Daß die Wärme des von einer höheren Randtemperatur umgebenen Kernes abnimmt, ist mit physikalischen Gesetzen nicht vereinbar.

Mit diesen Berichtigungen sollen die Verdienste des verstorbenen Bergdirektors Venator in keiner Weise geschmälert werden. Seine wertvollen und praktischen, schon im Jahre 1911 veröffentlichten Untersuchungen bildeten eine wichtige Stütze der Gegner der Bitumentheorie.

[25]) Niederschrift 8 a. a. O., S. 4.

[26]) Braunkohlen 1925/26, S. 753.

[27]) Braunkohle 1925/26, S. 960.

Es liegen also wesentliche Differenzen innerhalb der gegebenen Versuchsbeobachtungen und theoretischen Berechnungen des Schrifttums vor. Eine Klärung soll versucht werden, nachdem die eigenen Versuche beschrieben worden sind.

Zur Ermittlung der Höhe und Verteilung der Anfangstemperatur dienten folgende hauptsächlich auf einem Niederlausitzer Werk unternommenen Versuche:

a) Messungen durch eingesteckte Thermometer,

b) Kalorimetermessungen,

c) Temperaturmessungen im Stapel,

d) Ermittelung der Temperaturverteilung beim Brikettierungsvorgang durch den Grad der Anschmelzung von Stoffen mit bekanntem Schmelzpunkt.

Zu a) Die Temperaturmessungen durch Thermometer, die in Bohrungen der Längsachse eingesetzt wurden, dienten hauptsächlich der Beobachtung des Verlaufes der Abkühlung der Brikettachse, wobei die zuerst angezeigte Höhe t_a als Kerntemperatur beim Beginn der Abkühlung angenommen wurde. Das Verfahren ist einfach und gestattet in kurzer Zeit eine große Anzahl von Beobachtungen. Es muß jedoch dabei die Ungenauigkeit in Kauf genommen werden, daß dem Brikettkern durch das Bohren mit 8 mm Durchmesser Wärme zugeführt wird, und daß das eingesteckte Thermometer vielleicht einige Grad zu hoch anzeigt. Daher wurden vergleichsweise einige Briketts angebohrt, die mehrere Tage lang in einem Raum von 25 ° gelegen hatten, deren Innentemperatur also als bekannt angenommen werden konnte. Bei diesen zeigte das Thermometer, nachdem man zu einer langsamen Bohrgeschwindigkeit übergegangen war, nach dem Bohren eine Temperatur von 28 ° an, die sich innerhalb 20 Minuten wieder auf 25 ° ermäßigte. Es wird aber hieraus nicht geschlossen, daß die Kerntemperatur der frisch gepreßten Briketts ebenfalls etwa 3 ° unter der angezeigten Temperatur lag. Zunächst ist anzunehmen, daß das heiße Bohreisen bei der erhöhten Temperatur von 67 ° mehr Wärme abführt als im kalten Zustand. Auch das mit einem Wärmegrad von etwa 20 ° eingeführte Thermometer und sein Quecksilber verbrauchen selbst Wärme, um auf 60 bis 70 ° gebracht zu werden. Da nun die weiteren Versuche zur Bestimmung der Anfangstemperatur annähernd dieselben Temperaturgrade ergaben, so kann man annehmen, daß die Thermometermessungen richtig sind, und daß die dem Umfang des Bohrloches zugeführte Wärme zur Erwärmung des Thermometers verbraucht wurde. Die Löcher wurden 80 bis 90 mm tief gebohrt, und es wurde etwas Bohrmehl in dem Loch belassen, um das Thermometer darin einzubetten. Daß einige Minuten durch das Anbohren verstrichen, ist unbeachtlich, da

die Wärmeabnahme in der Plattenachse frühestens 10 Minuten nach Beginn der Abkühlung eintritt. Die so gemessenen Kerntemperaturen betrugen zwischen 65 ° und 69 ° bei 50 ° Temperatur der Preßkohle [28]).

$$T_k = 15 \text{ bis } 19\ ^\circ.$$

b) Zur Ermittlung des Wärmeinhaltes der Briketts beim Austritt aus der Presse $(T_k + T_r)$ wurde das Eiskalorimeter benutzt, das schon zur Bestimmung der spezifischen Wärme gedient hatte (Abb. 17). Sind Wärmeinhalt und spezifische Wärme bekannt, so läßt sich die durchschnittliche Anfangstemperatur berechnen

$$t_d = \frac{W_c}{c \cdot G}.$$

Durch die Schmelzwassermenge A ccm werden nachgewiesen

$$W_c = A \cdot 80{,}1 \text{ cal};$$

$$t_d = \frac{A}{c \cdot G} \cdot 80{,}1\ ^\circ C.$$

Bei der Ausführung der Versuche wurde ein Wurf von ca. 6 Stück zusammenhaftender Salonbriketts dem Pressenaustritt entnommen, in angewärmte Putzwolle gehüllt und möglichst schnell zum Kalorimeter getragen. Dort wurden zwei der mittleren Steine in je ca. 4 bis 5 Einzelstücke zerschlagen, aus der Putzwolle herausgenommen und eiligst in das Innengefäß des Kalorimeters zwischen Eisstücke gepackt. Das Zerschlagen mußte erfolgen, um eine Abkühlung in 4 bis 5 Stunden mit Sicherheit annehmen zu können (vgl. Anmerkung S. 37). Es hätte durch Verwendung kleiner Formate vermieden werden können; zur Kontrolle der anderen Messungen sollten jedoch diese Versuche auch an Salonbriketts ausgeführt werden.

Das Gewicht der Brikettstücke konnte, um Abkühlung vor dem Einlegen zu vermeiden, erst nach beendetem Versuch bestimmt werden. Es wurden daher nur kompakte Stücke ohne anhaftende einzelne Knorpel eingelegt. Außerdem lag auf dem Boden des Innengefäßes des Kalorimeters ein engmaschiges Sieb, um etwa abgelöste Knorpel aufzufangen.

Zur Bestimmung der spezifischen Wärme der Proben dienten Nachbarbriketts des Brikettstranges mit durch Analyse bekanntem Wassergehalt. Da die Kohle im Eis eine geringe Menge Feuchtigkeit annahm, wurde sowohl das nach Herausnehmen aus dem Kalorimeter ermittelte Gewicht, als auch die gemessene Schmelzwassermenge korrigiert. Übrigens betrug die Wasserzunahme der ziemlich großen Stücke nur 0,1 bis 0,3 %.

---

[28]) Vergleiche Spalte 5 in der Zusammenstellung der Versuche VI bis XV. S. 106/107.

In den Versuchstabellen sind die Daten eines mit dieser Anordnung durchgeführten Versuches aufgeführt, Versuch IVa, S. 105. Die Durchschnittstemperatur t_d betrug 69,6 °. Ein zweiter Versuch ergab 68,9 °. Die Temperatur der Brikettierkohle an der Zuführungswalze betrug $t_p = 50$ °, demnach

$$T_k + T_r = 19 \text{ bis } 20 \text{ °}.$$

c) Eine weitere Möglichkeit, die Anfangstemperatur zu bestimmen, auch wenn sie nicht sehr genau ist, bietet die Temperaturmessung im Stapel. Aus Abb. 12 geht hervor, daß die Wärme aus einem ca. 1 cbm großen Brikettstapel nur sehr langsam abfließt. Bei enger Schichtung sofort anschließend an die Pressung gleichen sich die Temperaturen im Brikett aus, und ihr Durchschnitt kann an Thermometern abgelesen werden. Die Briketts wurden mit möglichst noch aneinanderhaftenden Stirnflächen dicht neben der Presse zu einem etwa 1 cbm messenden Stapel zusammengesetzt, und zwar mit der glatten Fläche nach unten, Lage über Lage, wie in Abb. 13 dargestellt.

Die zwischen den Wölbungen verbleibenden horizontalen Kanäle wurden während der ersten Stunden mit Putzwolle verstopft. Um den Thermometern ca. 35 cm tief Eintritt zu gewähren, ohne offene Fugen zu lassen, wurden die Kanten je zweier anstoßender Briketts an den beabsichtigten Meßschächten abgeschärft, was ohne wesentlichen Zeitverlust beim Packen geschehen konnte.

Die Ungenauigkeit dieses Verfahrens besteht einerseits darin, daß die Briketts eine kurze Zeit, etwa 2 Minuten, der abkühlenden Luft ausgesetzt sind. Aus Abb. 7 ist ersichtlich, daß die Durchschnittstemperatur hierbei ca. 0,5 ° verloren hat. Andererseits kann ein Teil der auf diese Art bestimmten Temperatur von Selbsterwärmung durch Oxydationsvorgänge herrühren. Man müßte annehmen, daß diese sich größtenteils erst nach Stunden und Tagen zu einer wesentlichen Erhöhung der Gesamttemperatur auswirken, während zur Ablesung der Temperatur, die für den Pressenaustritt maßgebend sein sollte, die ersten Stunden nach Aufstellung des Stapels benutzt wurden. Ein Temperaturanstieg wurde nicht beobachtet.

Die ausgeführten Ermittlungen ergaben eine Gesamttemperatur von ca. 69 ° (Versuch V, S. 108), die mit den übrigen Messungen nahezu übereinstimmt.

$$T_k + T_r = 19 \text{ °}.$$

d) Schließlich wurde das bereits von Venator eingeschlagene Verfahren, die Temperaturverteilung bei der Brikettbildung an der Anschmelzung von eingestreuten leicht schmelzbaren Stoffen zu erkennen, angewandt. Die Späne der Metalle und Legierungen waren bis zu 5 mm lang. Die bei der Herstellung durch den Drehstahl entstandenen Riefen waren im Mikroskop und unter der Lupe deutlich zu erkennen: sie bildeten, wenn sie bei den im Brikett eingepreßten Spänen noch wahr-

genommen wurden, ein sicheres Kennzeichen, daß die Schmelztemperatur nicht erreicht worden war [29]).

Um das Auffinden der Späne im Brikett zu erleichtern, wurde nach der Beigabe der Metallspäne etwas Kreide vor die Zuführungswalze gegeben. Trotzdem schlugen einige Versuche fehl, da es nicht gelang, die Späne im Brikett zu entdecken. So wurde mit dem Schmelzpunkt 114 ° ein dreimaliger Versuch unternommen. Wenn jedoch die Auffindung der Späne im Brikett gelang, ergab dies schöne und einwandfreie Resultate.

Blei (Schmelzpunkt 322 °) [30]) war, wenn im Brikett eingebettet, nirgends geschmolzen. Die Späne ragten unverändert aus dem Brikettstück hervor. Auch ein bis dicht unter die Stempelschlagfläche reichender Span zeigte in 0,1 mm Abstand von der Fläche keine Anschmelzungen. Selbst bei den unter der Glanzhaut flach gedrückten Spänen war keine Veränderung zu bemerken; einer davon stand senkrecht zur Reibfläche eingebettet und war lediglich am äußersten Ende kurz umgebogen. Daß Bleispäne direkt in die ebene Reibfläche geraten waren, konnte zweimal beobachtet werden. Der eine Span war zu ca. 12 mm Länge ausgeschmiert, aber noch zusammenhängend; er machte, aus der Glanzhaut herausgelöst, einen ungeschmolzenen Eindruck. An dem anderen wurden auf der Reibfläche 2 bis 3 mm seitlich von dem Hauptstreifen noch einige abgesprengte, ebenfalls flach geschmierte Teilchen bemerkt. Ob diese im geschmolzenen Zustand abgetrennt oder durch mechanische Einwirkung abgerissen worden waren, war zweifelhaft.

Es kann daher nicht mit Sicherheit geschlossen werden, daß an der direkten Berührungsfläche zwischen Schwalbung und Brikettstrang die Schmelztemperatur des Bleis erreicht worden war, und der Verfasser neigt mehr der gegenteiligen Auffassung zu. Sicher ist jedoch, daß selbst in kürzester Entfernung von der Reibfläche, sogar innerhalb der ca. 0,3 mm starken Glanzhaut, eine Temperatur von 322 ° nicht vorgelegen hat.

Eine Legierung aus 2 Teilen Zinn und 3 Teilen Blei mit Schmelzpunkt 200 ° gab die interessantesten Ergebnisse über die Temperaturverteilung bei der Bildung des Briketts. Auf der ebenen Reibfläche waren die Späne auf mehrere Zentimeter Länge und Breite in viele kleine Tröpfchen auseinandergezogen und flach geschmiert. An der Reibfläche waren 200 ° zweifellos erreicht worden. Doch wurden Späne, die parallel zur Reibfläche gelagert waren, mit 1 mm Abstand von der Oberfläche und selbst, wenn sie bis an die Glanzhaut heranreichten, umgeschmolzen vorgefunden.

---

[29]) Der Schmelzpunkt variiert nur sehr wenig mit dem äußeren Druck. Nernst, Theoretische Chemie, Verlag Enke, Stuttgart 1926, S. 77. Für praktische Zwecke kann von dieser Veränderlichkeit abgesehen werden.

[30]) Die Schmelzpunkte des Bleis und der drei anschließenden Legierungen sind der Metallkunde von Fenchel, Verlag Boyser & Maasch, Hamburg 1911, S. 172, entnommen.

Die senkrecht zur Oberfläche eingebetteten Späne waren zu flachgedrückten runden Tröpfchen von buckeliger Oberfläche geschmolzen, was jedoch auf Wärmeleitung innerhalb des Metalls und nicht auf Erhitzung der Brikettmasse zurückgeführt werden soll. Die Stirnflächen hatten ebenfalls die Schmelztemperatur erreicht. An tiefer als 2 bis 3 mm eingebetteten Metallstücken wurde keine Veränderung bemerkt, sie zeigten auch noch die gekrümmte Form, wie sie die Drehbank verlassen hatten. Es kann hieraus geschlossen werden, daß die 200° Grenzlinie dicht unter der Glanzhaut, also in 0,3 mm Abstand von der Oberfläche, verläuft (vgl. Abb. 22).

Die Zinn-Blei-Wismutlegierung (1 : 2 : 1) mit Schmelzpunkt 149° gab folgenden Befund: Ein parallel zur Reibfläche eingepreßter Span war an

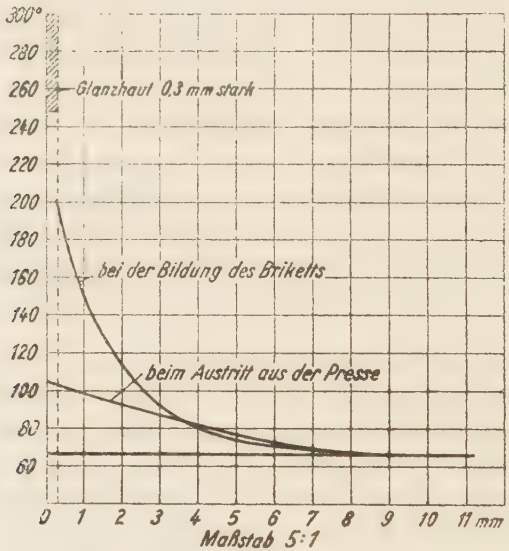

Abb. 22. Temperaturverteilung im Brikett während der Pressung und beim Austritt aus der Presse.

der in 1 mm Entfernung verlaufenden Kante angeschmolzen, an der anderen Kante jedoch unversehrt. Tiefer eingebettete Späne waren nicht geschmolzen. Auf der Stempelschlagfläche fanden sich die von einem zersprengten Span herrührenden, auf ca. 1 qcm verteilten kleinen flachgedrückten Tröpfchen; in der Negativfläche war ein in der Schriftvertiefung gerade noch zu erblickender Span anscheinend unversehrt. Die 150° Isotherme soll daher in etwa 1 mm Abstand unter der Oberfläche verlaufen.

Die Legierung mit Schmelzpunkt 98° aus 3 Teilen Zinn, 6 Teilen Blei und 8 Teilen Wismut ergab leider keine deutlichen Ergebnisse, trotzdem auch dieser Versuch mehrmals wiederholt wurde. Mit Sicherheit ließ

sich an einem 11 mm unter der ebenen Oberfläche eingebetteten Span nur feststellen, daß er nicht geschmolzen war.

Der Schmelzpunkt der Lipowitzlegierung war beim Einkauf von der Scheering & Kahlbaum A. G. Berlin zu ca. 70° angegeben worden [31]). Probeversuche zeigten bei 68° bereits geringe Anschmelzungen. Bei 74° war die Legierung flüssig.

In einem Abstand bis zu ca. 5 mm von der Brikettoberfläche war eine vollkommene Schmelzung eingetreten. Das Metall war in viele kleine Tröpfchen von buckeliger Form verteilt. Tiefer eingebettete Späne waren in ihrer Form unverändert, zeigten jedoch ebenfalls leichte Anschmelzungen an der Berührung mit Kohle. An den Stirnflächen der Briketts war Schmelzung eingetreten. Es soll hieraus geschlossen werden, daß die 74° Isotherme in etwa 5 mm Entfernung von der Brikettoberfläche verläuft.

Die Versuche mit der Woodschen Legierung bestärkten diesen Befund. Der Schmelzpunkt [32]) war in Probeversuchen zu etwa 2° geringer als der der Lipowitzlegierung ermittelt worden. Das Metall war bis zu einer Entfernung von ca. 9 mm vom Rande geschmolzen; im Brikettinnern zeigte es Anschmelzungen, woraus geschlossen werden konnte, daß eine Temperatur von 66 bis 67° durch den ganzen Brikettquerschnitt geherrscht hatte. Der Grad der Anschmelzung erschien innerhalb des Brikettkernes gleich.

Es wurde noch ein Versuch mit Kolophoniumstückchen gemacht. Diese fanden sich im Brikett als Körner wieder. Ob sie geschmolzen waren, ließ sich jedoch hieraus nicht nachweisen, da vorher festgestellt war, daß Kolophonium auch nach der Schmelzung die gleiche Eigenschaft wie vor der Schmelzung hat. Da das Kolophonium schon bei 60° weich zu werden beginnt und erst bei 75° schmilzt, so hätte eine genaue Temperaturhöhe ohnehin nicht festgestellt werden können. Auch Schellack erwies sich als ungeeignet, da sein Schmelzpunkt ebenfalls über ein zu großes Temperaturintervall 65 bis 91° verteilt liegt.

Schließlich wurde noch die Temperatur der Oberfläche des Brikettstranges beim Austritt aus der Presse ermittelt. Dazu diente pulverisierter Schwefel, dessen Schmelzpunkt etwa 110° beträgt. Nur die feinsten Körnchen kamen beim Aufstreuen auf den austretenden Brikettstrang zum Schmelzen. Die Legierung von Lipowitz und die mit Schmelzpunkt 98° wurden geschmolzen, diejenige mit 114° nicht. Ebenso wurde Kolophonium beim Aufdrücken auf den Strang geschmolzen. Es kann also angenommen werden, daß die am Buckel hoch erhitzte Oberfläche des

---

[31]) Ledebur-Bauer, Die Legierungen, Verlag Krayer. Berlin 1924, S. 132, Lipowitzlegierung 70°. Fenchel, a. a. O., S. 171, ebenfalls 70°.

[32]) Der Schmelzpunkt richtet sich nach der Zusammensetzung, die nicht immer genau bekannt ist. Die Scheering & Kahlbaum A.-G. konnte ihn nicht angeben. Ledebur-Bauer a. a. O., S. 132, 60,5°. Fenchel a. a. O., S. 171, 60 bis 72°.

Brikettstranges sich bis zum Pressenaustritt wieder bis auf ca. 105 ° abgekühlt hat.

Bei den soeben beschriebenen Versuchen hatte die Preßkohle an der Zuführungswalze eine Temperatur von $t_p = 50$ °, der Buckel betrug 9 mm auf 120 mm Länge, die Höhe der Briketts 60 mm. Die übrigen Versuchsdaten sind aus S. 58 ersichtlich.

Aus den durch die Anschmelzung an eingepreßten Legierungen gemachten Feststellungen geht hervor, daß die Kernerwärmung $T_k = 16$ bis 17 ° betrug. Einige zu gleicher Zeit durch eingesteckte Thermometer gemachten Messungen bestätigten eine Kerntemperatur von 66 bis 67 °.

Um über die Größe der Randerwärmung ein Maß zu bekommen, wurde die aus der Anschmelzung der Legierungen zu entnehmende Temperaturverteilung auf Abb. 22 graphisch dargestellt. Auf der Abszisse sind die Entfernungen von der Oberfläche der Brikettplatte fünffach vergrößert eingetragen. Der zwischen der oberen Kurve und der Horizontalen bei 67 ° eingeschlossene Flächeninhalt wurde planimetriert und durch die halbe Brikettstärke dividiert. Es ergab sich, daß die Randerwärmung bei der Bildung des Briketts gleich einer Wärmemenge ist, die die ganze Brikettplatte um etwa 8,5 ° erwärmen würde.

Diese starke Erwärmung kann, solange man das normale Leitvermögen des Briketts berücksichtigt, nicht durch Wärmeleitung von den hoch erhitzten Reibungsflächen des Arbeitsstückes in das Innere erklärt werden. Man kann unter der Annahme, daß das Brikett gleichmäßig von einer Umgebung von 300 ° eingehüllt wäre, und daß der Wärmeübergang in das Brikett widerstandslos geschieht ($\alpha = \infty$; die Reibungswärme ist zugleich Oberflächentemperatur), die Temperaturerhöhung berechnen, die während der Berührung mit der Schwalbungsverengung von der Brikettoberfläche aufgenommen und ins Innere geleitet werden kann. Diese Zeit entspricht etwa 7½ Pressenumdrehungen, sie beträgt

$$z = \frac{7{,}5 \cdot 60}{132} = 3{,}4 \text{ Sek.} = 0{,}001 \text{ h.}$$

Auch eine geringere Umdrehungszahl würde das Ergebnis nicht wesentlich verändern. Bei der Berechnung wurde die Temperatur der Brikettmasse zu $t_a = 67$ °, der Umgebung zu $t_b = 300$ ° und die Wärmeleitzahl $\lambda = 0{,}23$ eingesetzt. Es ergab sich, daß die Durchschnittstemperatur in der Zeit $z = 0{,}001$ h nur um 1 ° steigt. Das ist nur ein Bruchteil der oben zu 8,5 ° ermittelten Randerwärmung bei der Entstehung des Briketts.

Die Erwärmung der Randzonen des Briketts kann also durch Wärmeleitung unter Einsatz der unter normalen Verhältnissen als gültig ermittelten Wärmeleitzahl ($\lambda = 0{,}23$) nicht erklärt werden. Es war (S. 46) die Vermutung offen gelassen worden, daß auf den Randzonen ein besonders starker Druck lastet, der zu einer zusätzlichen Erwärmung beiträgt. Daß aber die schroffen Temperaturunterschiede nach Abb. 22 durch ungleiche Druck-

verteilung hervorgerufen werden, ist nicht glaubhaft. Vielmehr ist anzunehmen, daß in den Randzonen des frisch entstandenen und noch in der Bildung begriffenen Briketts außergewöhnliche Wärmetransportbedingungen bestehen. Die höhere Temperatur vergrößert an sich die Wärmeleitfähigkeit und, soweit ein plastischer Zustand oder eine Verflüssigung des Bitumens eintritt, würde die Wärmeleitung durch Wärmekonvektion vergrößert. Auch geschieht die Verschiebung der Schichten nach dem Inneren beim Passieren des Buckels infolge der verschiedenen Korngrößen wohl nicht ganz parallel zueinander, sie werden durchgeknetet und transportieren die Wärme mit in das Innere.

Für den Entwurf der Temperaturverteilung im Augenblick des Austritts aus der Presse liegt nur die Feststellung vor, daß die Temperatur der Oberfläche des Brikettstranges ca. 105 ° beträgt. Man kann also annehmen, daß derjenige Teil der Randerwärmung, der bei der Brikettbildung über 105 ° lag, im Formauslauf an die gekühlte Form abgegeben worden ist. Die Temperaturverteilung beim Austritt aus der Presse würde dann so verlaufen, wie in Abb. 22 durch die untere Kurve dargestellt, und die noch vorhandene Randwärme entspricht einer Temperaturerhöhung des gesamten Brikettquerschnittes von

$$T_r = \text{ca. } 4\,^{\circ}.$$

Auch die Herabminderung der Randtemperatur auf dem Weg vom Buckel bis zum Pressenaustritt, zu der allerdings etwa 15 Pressenumdrehungen = ca. 7 Sekunden zur Verfügung stehen, läßt sich durch Wärmeleitung mit $\lambda = 0{,}23$ nicht erklären, wenn auch hier die Berechnung der praktischen Feststellung näher kommt. Es wird also die Wärmeleitfähigkeit in dem noch nicht vollkommen gefestigten Brikettstrang, der sich beim Austritt aus der Presse noch klebrig anfühlt, ebenfalls höher gewesen sein als bei normalen Temperaturen.

Die Erwärmung beim Verpressen einer Kohle von 50 ° mit 132 Umdrehungen/Minute wurde also zusammenfassend folgendermaßen bestimmt: Die angeführten Zahlen gelten für den Zeitpunkt des Austritts aus der Presse.

a) Nach den Thermometermessungen durch Anbohren der Brikettachse

$$T_k = 15 \text{ bis } 19\,^{\circ}.$$

b) Nach den Wärmeinhaltsbestimmungen mit dem Eiskalorimeter

$$T_k + T_r = 19 \text{ bis } 20\,^{\circ}.$$

c) Die Temperaturmessungen im Stapel ergaben

$$T_k + T_r = 19\,^{\circ}.$$

d) Die Temperaturbestimmungen an dem Schmelzgrad eingestreuter Legierungen ergaben

$$T_k = 17\,^{\circ},$$
$$T_r = 4\,^{\circ}.$$

Wir können dieses Kapitel nicht verlassen, ohne die Ergebnisse der ausgeführten Versuche durch Aufstellung einer Bilanz der im Preßkopf umgesetzten Energien vervollständigt zu haben, da sich die Abweichungen unserer Messungen von den Angaben von Venator und Foos am besten an Hand der von beiden Forschern ebenfalls aufgestellten Wärmebilanzen überprüfen lassen.

1. Pressenleistung am Motor gemessen 87 KW	118	P. Si
Briketterzeugung pro Stunde	3950	kg/St
Umdrehungen pro Minute	132	Umdr/Min
Stückleistung pro Stunde $132 \cdot 60$	7920	Brik./St
Pressenleistung $\frac{118 \cdot 75 \cdot 3600}{7920}$	4025	mkg/Brik.
Aquivalent $\frac{4025}{428}$	9,4	kcal/Brik.
2. Kühlwassermenge pro Stunde	1800	kg/St
Erwärmung des Kühlwassers, $34^0 - 25{,}6^0$	$8{,}4^0$	
Abgeführte Wärme $1800 \cdot 8{,}4$	15100	kcal/St
Pro Brikett	1,91	„ /Brik.
3. Temperatur des Preßkopfes ca.	59^0	
Temperatur im Pressenhaus	22^0	
Temperaturdifferenz $t_1 - t_2$	37^0	
Oberfläche des Preßkopfes F	7,3	qm
Wärmeübergang durch Übertragung und Strahlung (vergl. Seite 76) $\alpha =$ ca.	9	kcal/m²h°C
Wärmeabgabe des Preßkopfes $Q = \alpha \cdot F (t_1 - t_2) = 9 \cdot 7{,}3 \cdot 37 =$	2430	„ /St
Pro Brikett	0,31	„ /Brik.
4a. Randerwärmung T_r	4^0	
Verbraucht $3950 \cdot 0{,}466 \cdot 4$	7360	„ /St
Pro Brikett	0,93	„ /Brik.
4b. Kernerwärmung T_k	17^0	
Verbraucht $3950 \cdot 0{,}466 \cdot 17$	31300	„ /St
Pro Brikett	3,95	„ /Brik.
5. Pressenleistung (s. o.)	9,40	„ / „
Durch 2 bis 4 nachgewiesen $1{,}91 + 0{,}31 + 0{,}93 + 3{,}95$	7,10	„ / „
6. Leerlauf und Schubarbeit, Restbetrag	2,30	„ / „

Zusammenstellung.

	kcal/Brikett	v. H.	PS
1. Pressenleistung	9,40	100	118
2. Kühlwasser	1,91	20,3	24,0
3. Wärmeabgabe des Preßkopfes	0,31	3,3	3,9
4a. Randerwärmung T_r 4°	0,93	9,9	11,7
4b. Kernerwärmung T_r 17°	3,95	42,0	49,5
5. Restbetrag: Leerlauf und Schubarbeit . .	2,30	24,5	28,9

Es ist also die Umsetzung von 75,5 v. H. der am Motor gemessenen mechanischen Energie in Wärme nachgewiesen. Die restlichen 24,5 v. H. sind ein angemessener Betrag für Leerlaufsverluste und die Schubarbeit des über 100 m langen und ansteigend geführten Brikettstranges und für möglicherweise entstandene andere Energieformen, falls solche überhaupt in Frage kommen sollten. Unberücksichtigt blieb ferner dabei, daß die aus der Preßkohle entweichende Luft beim Zusammenpressen erwärmt wird und vielleicht eine geringe Wärmemenge mit sich abführt.

Zu der dem ganzen Brikettquerschnitt übermittelten Kernerwärmung werden ca. 42 v. H. verbraucht, auf die Randvorgänge entfallen ca. 34 v. H. Die durch Wasser gekühlte Schwalbung nimmt infolge der guten Wärmeleitfähigkeit des Eisens ($\lambda = 30$ bis 55) einen Teil der bei der Verdichtung des Briketts am Buckel entstehenden Wärme direkt ab und entzieht dem Brikett auf dem Wege vom Buckel bis zum Austritt aus der Presse einen Teil der ursprünglichen im Brikett gebildeten Randerwärmung.

Um einen Vergleich zu erleichtern, sei auch die von Venator[34]) aufgestellte Energiebilanz seiner Versuche wiedergegeben:

	kcal/St	v. H.	PS
1. Pressenleistung	54 681	100	86,7
2. Kühlwasser	12 760	23,3	20,2
3. Ausstrahlung, Preßkopf	876	1,6	1,4
4. Briketterwärmung: $T_k + T_r = 7{,}7 + 3{,}9 = 11.6°$ 2690 (kg) . 0,24 . 11,6 = ...	7 491	13,7	11,9
5. Restbetrag: Leerlauf und Schubarbeit . .	33 554	61,4	53,2

[34]) Venator a. a. O., S. 94, 95.

Der außerordentlich hohe, für Leerlauf und Schubarbeit übrig bleibende Betrag von 61,4 v. H. ist auffallend. Baudenbacher[35]) mildert ihn zwar, indem er statt der von Venator für die spezifische Wärme zu niedrig eingesetzten Zahlen ($c = 0{,}24$) die von ihm ermittelte ($c = 0{,}58$) eingesetzt hat. Es bleiben jedoch auch dabei noch 41,6 v. H. für den Leerlauf und Schubarbeit übrig und nur 58,4 v. H. der Pressenleistung würden in Wärme umgesetzt worden sein.

Wie schon auf S. 48 angedeutet, liegt die Vermutung nahe, daß Venator die Kernerwärmung des Briketts ($T_k = 7{,}7\,^0$) zu gering gemessen und eingesetzt hat. Wenn beispielsweise $T_k = 15\,^0$ betragen hätte, und

$$T_k + T_r = 15 + 4 = 19\,^0,$$

so ergibt sich untenstehende Umrechnung der Aufstellung. Es wurde dabei noch eine Korrektur für die Abgabe der Wärme des Preßkopfes durch Wärmeübertragung eingefügt, da Venator nur die Strahlung berücksichtigt hatte. Als spezifische Wärme bei 14 % Wassergehalt kann für das Bornaer Revier $c = 0{,}534$ [36]) eingesetzt werden. Die umgerechnete Aufstellung ergibt sodann einen besser passenden Prozentsatz für den Leerlauf und den Schub des Brikettstranges, ca. 23 v. H.

	kcal/St	v. H	PS
1. Pressenleistung	54 681	100	86,7
2. Kühlwasser	12 760	23,3	20,2
3. Wärmeabgabe des Pressenkopfes	1 800	3,3	2,9
4. Briketterwärmung: $T_k + T_r = 19^0$ $2690 \cdot 0{,}534 \cdot 19$	27 300	50,0	43,3
5. Restbetrag: Leerlauf und Schubarbeit . .	12 821	23,4	20,3

Zum Schluß soll nochmals auf die Aufstellung von Foos[37]) zurückgekommen werden. Es war bereits auf S. 49 die errechnete Temperatur-

[35]) Baudenbacher, Beiträge zur Brikettierung, Braunkohle 1925/26, S. 969.

[36]) Nach Burkhardt und Fritzsche, Braunkohlenarchiv 1927, Heft 17. S. 31 c_0 (Borna) = 0,458.

[37]) Foos, Braunkohle 1925/26, S. 753 bis 756.

erhöhung des Briketts beim Preßvorgang (nach Foos $T_k + T_r = 42°$ C, nach Baudenbacher 28,6°) als vermutlich zu hoch bezeichnet worden. Eine Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Verfassers läßt sich dadurch erzielen, daß die durch das Kühlwasser abgeführte Wärmemenge, die Foos am Schlusse seiner Abhandlung angibt, vor Errechnung der Erwärmung des Briketts abgesetzt wird. Hierbei ist die durch die oben gemachten Feststellungen begründete Auffassung zugrunde zu legen, daß ein Teil der in Wärme umgesetzten Pressenenergie am Formbuckel direkt von der Form aufgenommen wird (vgl. S. 59). Wird noch für die Wärmeabgabe des Preßkopfes ein angemessener Betrag eingefügt, so lautet die Energiebilanz von Foos:

	kcal/Brikett	v. H.	PS
1. Pressenleistung	10,51	100	90,0
2. Davon ab, wie von Foos angenommen, für Leerlauf und Schubarbeit 15% + 10%. .	2,47	23,5	21,2
3. Kühlwasser	3,84	36,5	32,8
4. Wärmeabgabe Preßkopf	0,30	2,9	2,6
5. Restbetrag: Briketterwärmung $T_k + T_r$.	3,90	37,1	33,4

Der für Brikettiererwärmung übrigbleibende Betrag von 3,90 kcal/Brikett würde bei dem von Foos angenommenen Brikettgewicht von 500 g, jedoch bei einer spezifischen Wärme $c = 0{,}466$ eine Temperaturzunahme hervorrufen

$$T_k + T_r = \frac{3{,}90}{0{,}5 \cdot 0{,}466} = 17°.$$

Es ist also eine ziemlich gute Übereinstimmung mit den Messungen des Verfassers erzielt.

Die Abfuhr der Randwärme, die beim Austritt aus der Presse einer allgemeinen Erwärmung des Brikettstranges um etwa 4° entspricht, wie auf S. 57 aus der Abb. 22 errechnet wurde, geschieht in der an die Presse anschließenden Kühlrinne. Der Brikettstrang ist nunmehr im Pressenhaus von Luft von etwa 20° umgeben, und der Wärmeübergang, der innerhalb der Schwalbung als sehr gut angenommen worden war, wird bedeutend verschlechtert. Bei einer für die nächsten Minuten anzunehmen-

den mittleren Oberflächentemperatur von etwa 80 °, also einem Wärmegefälle von 60 °, kann man mit

$$\alpha = 12\ ^{38})$$

rechnen. Die Wärmeleitzahl wird nunmehr wieder zu $\lambda = 0{,}23$ angenommen. Die Berechnung ergibt, daß eine Zeitdauer von

$$z = 0{,}118\ \text{h} = 7{,}1\ \text{Minuten}$$

erforderlich ist, um einen Wärmebetrag von etwa 4 ° Durchschnittstemperatur abzuführen. Es kann nicht behauptet werden, daß tatsächlich zuerst nur die Randwärme abgeführt wird und nach 7 Minuten der Temperaturverlauf genau durch die in Abb. 22 bei 67 ° gezogenen Horizontale dargestellt würde. Vielmehr könnte bei verhältnismäßig schlechtem Wärmeübergang ($\alpha = 12$) befürchtet werden, daß ein Teil der Randerwärmung sich nach dem Brikettinnern zu ausbreitet und die Innentemperatur vorübergehend etwas erwärmt. Dabei kann es sich jedoch nur um ganz geringe Beträge handeln, denn aus dem in Abb. 8 und 9 dargestellten Temperaturverlauf innerhalb der erkaltenden Körper geht deutlich hervor, daß die Abkühlung während der ersten Abkühlungszeiten lediglich die Randzonen betrifft. Wenn wir also nach Abfuhr der Randerwärmung und nach Verstreichen einer hierzu angemessenen Zeitspanne für die Betrachtung der weiteren Abkühlung von einer gleichmäßigen Anfangstemperatur ausgehen, so ist die Ungenauigkeit nicht groß.

Dies wurde durch die ausgeführten Versuche bestätigt. Wie schon erwähnt, wurde der Verlauf der Abkühlung durch Thermometer, die in die Brikettlängsachse eingeführt wurden, registriert. Bei Abkühlung in ruhender Luft zeigte der beobachtete Verlauf der Temperatur der Plattenachse (t_m) Übereinstimmung mit der rechnerisch ermittelten Kurve, wenn ihm eine Vorgabe von 7 Minuten gegeben würde (vgl. hierüber S. 81). Die t_m-Kurve der Abb. 5 beispielsweise müßte, um der Wirklichkeit zu entsprechen, um

$$z = 7\ \text{Minuten} = 0{,}117\ \text{h}$$

vom Ansatzpunkt nach links horizontal verlängert werden, und die in Abb. 10 gemachten Zeitangaben gelten für die Praxis sämtlich für eine entsprechend vermehrte Abkühlungsdauer.

Bei den Versuchen mit künstlicher Kühlung, die zur Ermittlung von Wärmeübergangszahlen ausgeführt wurden, wurde der Randerwärmung dadurch Rechnung getragen, daß der zu beobachtende Brikettwurf 7 Minuten nach der Entnahme am Pressenaustritt in die Kühlvorrichtung eingebracht wurde. Die Zeitspanne reichte für das Zusammenbinden, Anbohren und den Transport zum Laboratorium gerade aus. Bei den Erwärmungs-

---

[38]) S. 75 und Abb. 29, α_l = ca. 7,0,
S. 73 und Abb. 28, α_s = ca. 5,0,
α = ca. 12,0.

versuchen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit war die Vorgabe natürlich nicht nötig, da hier von einer gleichmäßigen Anfangstemperatur ausgegangen wurde.

Es könnte noch berechnet werden, wie weit die Zeit zur Abfuhr der Randwärme durch Verbesserung des Wärmeüberganges am austretenden Brikettstrang verkürzt werden kann. Wenn beispielsweise durch Anblasen mit gegen den Strang gerichteten wirbelnden Luftströmen eine

$$\text{WÜZ } \alpha = 70\ ^{39})$$

erzielt werden würde, so könnte die Verringerung der Durchschnittstemperatur um

$$t_d = 4\ ^0$$

schon nach $z = 0{,}033$ h $= 2$ Minuten herbeigeführt werden. Man muß also denjenigen Werken, auf denen eine künstliche Kühlung der Briketts durch Belüften oder Berieseln stattfindet, empfehlen, diese möglichst sofort nach dem Austritt aus der Presse vorzunehmen. Es würde dadurch das hohe Temperaturgefälle zwischen Brikettstrang und Umgebung günstig ausgenutzt und die Randwärme hemmungslos abgeführt, ehe sie vielleicht doch den Weg ins Brikettinnere nimmt.

Über den Einfluß der Anfangstemperatur auf den Abkühlungsverlauf gibt Abb. 23 Aufschluß. Es ist der Verlauf der Durchschnittstemperatur bei Anfangstemperaturen von 75 °, 65 ° und 55 ° und einer Endtemperatur von 20 ° für Wärmeübergang $\alpha = 8$ und $\alpha = 70$ dargestellt.

Es ergeben sich folgende Zahlenwerte der Durchschnittstemperaturen:

	$\alpha = 8$				$\alpha = 70$			
	t_d °	t_d °	t_d °	Diffz.	t_d °	t_d °	t_d °	Diffz.
Anfangstemperaturen . . .	75	65	55	10,0	75	65	55	10,0
Nach ½ St.	63	55,5	48	7,5	47	42	37	5
nach 1 St.	54,5	48,5	42,5	6,0	35	32,5	30	2,5
nach 2 St.	43	39	35	4,0	26	25	24	1

Da die Temperatur-Zeitkurven einem gemeinsamen Endpunkt zustreben, verringern sich die zu Beginn vorhandenen Differenzen im Verlauf der Abkühlung mehr und mehr.

---

[39]) Diese Zahl wurde hier und in den folgenden Berechnungen im Hinblick auf die im Kapitel Wärmeübergangszahl gemachten Vorschläge gewählt. Zwischen $\alpha = 70$ und $\alpha =$ ca. 600 (Wärmeübergang im Wasser) besteht praktisch kein großer Unterschied. Vergl. Abbildung 31.

Würde es durch Verbesserungen im Kühlhause gelingen, die Temperatur der Preßkohle und damit die des austretenden Briketts um 10 ° zu verringern, so erzielt man, wenn die Abkühlung des Brikettstranges in ruhender Luft stattfindet ($\alpha = 8$), daß das Brikett nach ½ Stunde eine um 7,5 °, nach 2 Stunden eine um 4 ° verminderte Durchschnittstemperatur gegenüber dem früheren Zustand aufweist. Die durch Vorkühlung der Brikettierkohle erzielte Verringerung der Brikettanfangstemperatur um 10 ° wirkt sich also nur zu dem Teilbetrag von 7,5 ° bez. 4,0 ° in einer tatsächlichen kälteren Verladetemperatur aus.

Findet die Abkühlung des Brikettstranges bei guter Belüftung ($\alpha = 70$) statt, so ist der Nutzeffekt der Kühlung im Kühlhause auf die

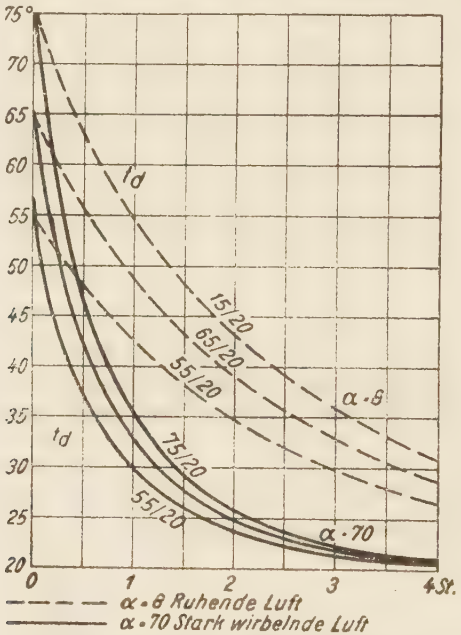

Abb. 23. Einfluß der Höhe der Anfangstemperatur auf die Abkühlung des Brikettstranges.

Verladetemperatur noch geringer geworden. 10 ° Temperaturerniedrigung der Brikettierkohle bedeuten nur eine Senkung der Verladetemperatur um 5 ° nach ½stündiger und um 1 ° nach 2stündiger Kühldauer des Brikettstranges.

Es sei zunächst angenommen, daß die dem ganzen Brikettquerschnitt durch den Preßvorgang übermittelte Erwärmung an verschiedenen gekühlten Brikettierkohlen die gleiche sei. Wenn also T_k beispielsweise 15 ° beträgt und es gelangt je nach der Erhitzung beim Trocknen und der Intensität der Kühlung im Kühlhaus Brikettierkohle von 60 °, 50 ° oder 40 ° vor den Stempel, so betrage die Anfangstemperatur des gebildeten

Briketts 75°, 65° oder 55°. Von der Randerwärmung sei hier abgesehen. Daß Briketts mit niedriger Anfangstemperatur auch bei der Verladung kühlere Temperaturen aufweisen, ist selbstverständlich; die soeben gemachten Feststellungen zeigen jedoch, daß der Nutzen, den eine verbesserte Kühlung der Brikettierkohle auf die Verladung haben soll, mit längerer Dauer der Abkühlung des Brikettstranges und mit verbessertem Wärmeübergang immer geringer wird.

Beabsichtigt man also, kältere Verladetemperaturen durch verstärkte Kühlung der Brikettierkohle zu erzielen, so muß man sich darüber klar sein, daß diese sich an der Verladung nur zu einem Teilbetrag auswirkt, und daß die im Kühlhaus etwa gemachten zusätzlichen Aufwendungen in bezug auf die Verladetemperatur eine gewisse Unwirtschaftlichkeit in sich tragen. Wo die Kühlung des Brikettstranges nur kurz ist, etwa 100 m einfache Kühlrinne mit ca. ½stündiger Kühldauer, so kann man pro 1° Temperaturerniedrigung am Pressenaustritt noch ca. 0,8° Senkung der Temperatur der Verladung erwarten; wo jedoch eine verlängerte Kühldauer im Kühlschrank oder Belüftung der Brikettrinnen bereits stattfindet, so kann man nur mit einem ganz geringen Einfluß etwaiger verstärkter Vorkühlung der Brikettierkohle auf die Temperatur der zu verladenden Briketts rechnen.

Es kommt hinzu, daß kalte Kohle sich durch die Pressung stärker erhitzt als warme, wie von Venator (vgl. S. 48) festgestellt wurde, und durch erhöhte Reibung beim Verpressen kalter Kohle erklärt wird. Wenn Verfasser auch den außerordentlichen von Venator angegebenen Unterschied der Temperaturerhöhungen beim Verpressen kalter und warmer Kohle etwas bezweifelte, so blieb die Tatsache der stärkeren Erwärmung kalter Kohle trotzdem bestehen. Sie entspricht auch der praktischen Erfahrung, daß heiße Kohle leichter zu verpressen ist als kalte. Es würde also auch hierdurch ein Teil der für eine bessere Vorkühlung der Brikettierkohle gemachten Aufwendungen verloren gehen. Diese Erwägungen drängen zu folgendem Schluß:

Die Vorkühlung der Brikettierkohle sollte ausschließlich unter dem Gesichtspunkt geschehen, eine gute Brikettqualität zu erzielen, also nur so weit, als es lediglich zur Durchmischung und Angleichung des Trocknungs- und Wärmegrades der einzelnen Korngrößen untereinander erforderlich ist[40]). Zur Kühlung des zu verladenden Briketts, also zur Herabminderung der Verladetemperatur, ist die Verbesserung des Wärmeüberganges weit mehr zu empfehlen, und die hier gemachten Aufwendungen kommen voller zur Auswirkung als im Kühlhaus. Es sei an Hand der Abb. 23 darauf hingewiesen, daß der von einer Anfangstemperatur von 75° mit einem Wärmeübergang $\alpha = 70$ ge-

[40]) Vgl. Lamprecht, Braunkohle 1927/28, S. 169.

kühlte Brikettstrang bereits nach einer ½stündigen Kühldauer eine geringere Durchschnittstemperatur aufweist, als der von 55 ° an in ruhender Luft ($\alpha = 8$) gekühlte.

Diese Gedankengänge sollen nach Besprechung des Einflusses der Schnellkühlung auf die Brikettfestigkeit fortgesetzt werden (S. 93).

Der Einfluß der Temperatur der Umgebung t_b, die zugleich die Endtemperatur des gekühlten Briketts darstellt, geht aus Abb. 24 hervor. Es ist die Abkühlung des Brikettstranges von einer Anfangstemperatur von 65 ° auf folgende Endtemperaturen dargestellt:

$$t_b = +30\,°,\ 20\,°,\ 10\,°,\ 0\,°,\ -10\,°,$$

und zwar bei einem Wärmeübergang $\alpha = 8$ und $\alpha = 70$. Es ergibt sich

$\alpha = 8$

Temperatur am Anfang t_a °	65	65	65	65	65	Diffz.
nach ½ Stunde	57,5	55,5	53,5	51,5	49,0	2,0
nach 1 Stunde	53,0	48,5	45,0	41,0	37,5	4,0
nach 2 Stunden	44,5	39,0	33,0	27,0	21,5	6,0
Endtemperatur	+ 30	20	10	0	— 10	10

$\alpha = 70$

Temperatur am Anfang t_a °	65	65	65	65	65	Diffz.
nach ½ Stunde	47,0	42.5	36,5	31,5	26,5	5,0
nach 1 Stunde	40,0	32,5	25,5	18,0	11,0	7,5
nach 2 Stunden	33,5	25,0	16,0	7,0	— 2,0	9,0
Endtemperatur	+ 30	20	10	0	— 10	10

Die Differenz der Umgebungstemperaturen erzeugt bei Abkühlung in ruhender Luft ($\alpha = 8$) nur langsam Unterschiede in den Durchschnittstemperaturen, während sie bei gutem Wärmeübergang ($\alpha = 70$) schon in verhältnismäßig kurzer Zeit stärker einwirkt.

Steht zur Abkühlung in ruhender Luft nur eine 100 m lange Kühlrinne zur Verfügung, die in ½ Stunde von dem Brikettstrang durchlaufen wird, so erzeugt eine Verminderung der Außentemperatur um 10 ° eine

um 2 ° verbesserte Kühlung der Briketts bei der Verladung. Der Einfluß der Außentemperatur ist also innerhalb der üblichen Kühlzeiten verhältnismäßig gering. Die im Sommer bei + 30 ° Außentemperatur gekühlten Briketts haben nach ½ Stunde etwa 57,5 ° Gesamttemperatur; im Winter bei — 10 ° würde sie 49 ° betragen. Bei längerer Kühldauer nehmen die Unterschiede allmählich zu, wie aus Abb. 24 hervorgeht.

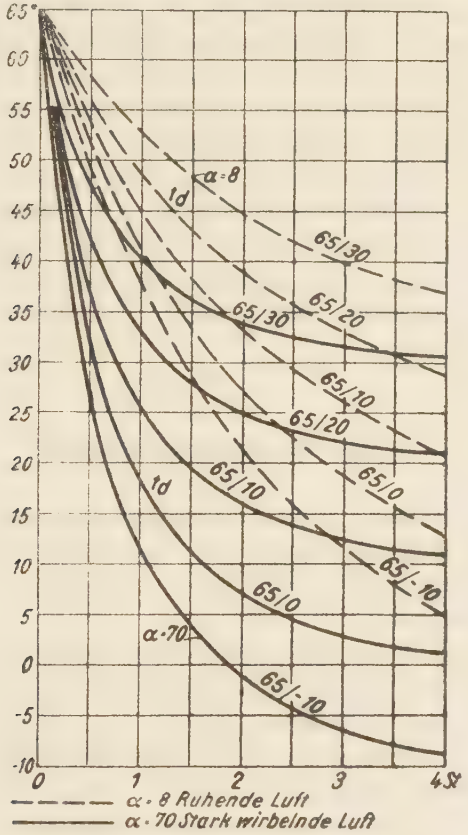

Abb. 24. Einfluß der Temperatur der Umgebung (+ 30 °, + 20 °, + 10 °, 0 °, — 10 °) auf die Abkühlung des Brikettstranges.

Bei gutem Wärmeübergang ist der Einfluß der Temperatur der Umgebung stärker. Der steile Abfall der t_d-Kurven mit $\alpha = 70$ ergibt schnell größere Temperaturintervalle auf den Ordinaten der Zeitwerte. Eine Veränderung der Außentemperatur um 10 ° hat schon nach ½ Stunde eine um 5 ° verbesserte Kühlwirkung. Würde der zur Belüftung dienende Wind künstlich gekühlt, so könnte man bei einem Kühlschrank, in dem das

[47]) Lamprecht, Braunkohle 1927/28, S. 171/172, Niederschrift 8, a. a. O., S. 4.

Brikett 2 Stunden lang gelagert wird, damit rechnen, 90 % der in ° C bewirkten Temperaturerniedrigung als Senkung der Verladetemperatur nutzbar zu machen. Vielleicht würde dieses Verfahren leichter anzuwenden sein, als eine verbesserte Vorkühlung der Brikettierkohle. Die Kühlung des künstlichen Windes könnte durch Verdunstung von Einspritzwasser bewirkt werden, wobei noch darauf aufmerksam zu machen ist, daß die Brikettfestigkeit bei der Abkühlung im mit Feuchtigkeit gesättigten Luftstrom verbessert wird [41]). Wenn also eine künstliche Belüftung der Brikettstränge vorgenommen wird, so ist zu empfehlen, den Kühlwind vor Eintritt in den Kühlschrank durch Berieseln mit Feuchtigkeit zu sättigen und seine Temperatur um einige Grad herabzumindern.

Aus Abb. 24 geht wiederum der überragende Einfluß des Wärmeüberganges auf die Abkühlung hervor. Der bei + 30 ° Außentemperatur im starken Luftwirbel ($\alpha = 70$) gekühlte Brikettstrang hat nach einer Kühldauer von ½ Stunde bereits eine geringere Durchschnittstemperatur, als der von kalter Luft von — 10 °, jedoch von ruhender Luft ($\alpha = 8$) umgebene.

6. Die Wärmeübergangszahl.

Der wichtigste Faktor in den Untersuchungen über die Abkühlung von Briketts ist die Wärmeübergangszahl, und die zur künstlichen Kühlung bis jetzt eingeschlagenen Wege beruhen hauptsächlich auf einer Verbesserung des Wärmeaustausches.

Die WÜZ α gibt diejenige Anzahl von kcal an, die pro qm Fläche und 1 ° Temperaturdifferenz in der Zeiteinheit h aus dem erkaltenden Körper in das umgebende Medium übergeht. Es sind die gesamten Erscheinungen der Wärmestrahlung, sowie der Wärmeleitung und Konvektion in der Wärmeübergangszahl enthalten. Demnach zerfällt α in die Bestandteile α_s und α_l, die zunächst einzeln untersucht werden sollen.

a) Der Wärmeübergang durch Strahlung.

Die von dem Brikett ausgehenden Wärmestrahlen treffen die Profileisen der Brikettrinnen, die über den Kühlrinnen vorhandene Holzbedachung, den Mantel des Kühlschrankes, den Erdboden, die benachbarten Rinnen und Brikettstränge, ferner Tragkonstruktionen, Gebäude usw.; ein letzter geringer Teil wird in die Atmosphäre ausgesandt.

An einzelnen für gewisse Annahmen durchzuführenden Betrachtungen soll die Größe der auf diese Weise abgegebenen Wärmemenge und die Wärmeübergangszahl α_s berechnet werden, um ein ungefähres Bild über die mögliche Größe zu bekommen und um schließlich einen, den verwickelten Umständen einigermaßen angemessenen Wert zu erhalten.

Ist F_1 die Oberfläche eines langgestreckten Körpers, der von einer langgestreckten Hülle mit der Innenfläche F_2 umgeben ist (vgl. Abb. 25), so ist die ausgestrahlte Wärmemenge [42])

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}\right)} \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \cdot F_1 \cdot z \cdot (\text{kcal})$$

wobei bedeutet

C_1 die Strahlungszahl des strahlenden Körpers (kcal/m² · h · (°C)⁴),
C_2 die Strahlungszahl des bestrahlten und reflektierenden Körpers (kcal/m² · h · (°C)⁴),
C_s die Strahlungszahl für absolut schwarze Strahlung (kcal/m² · h · (°C)⁴),
T_1 die absolute Temperatur des strahlenden Körpers $T_1 = t_o + 273$ (°C),
T_2 die absolute Temperatur des bestrahlten Körpers, die der Temperatur der Umgebung gleichgesetzt werden soll, $T_2 = t_b + 273$ (°C).

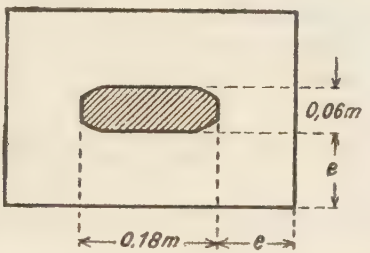

Abb. 25. Umhüllung eines Brikettstranges.

Es ist dann die pro Flächeneinheit, Zeiteinheit und pro Grad Temperaturdifferenz ausgestrahlte Wärmemenge

$$Q = \alpha_s = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2}\left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}\right)} \cdot \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^\circ\text{C})$$

$$\alpha_s = C \cdot a .$$

C ist der im speziellen Fall geltende Strahlungsfaktor (kcal/m² · h · (°C)⁴), a der Temperaturfaktor (°C)³.

Es sei zunächst der Strahlungsfaktor C untersucht. Die Strahlungszahl C_s der absolut schwarzen Strahlung ist bekannt. Die Strahlungszahlen C_1 und C_2 müssen physikalischen Tabellen entnommen werden oder durch Vergleich mit den dort angegebenen Zahlenwerten geschätzt werden [43]):

---

[42]) Gröber, Wärmeübertragung, a. a. O., S. 131. ten Bosch, a. a. O., S. 26.
[43]) Gröber, Wärmeübertragung, a. a. O., S. 196. ten Bosch, a. a. O., S. 8.

Absolut schwarzer Körper C_s	4,9
Schmiedeeisen, matt oxydiert	4,3
blank	1,6
hochpoliert	1,3

Ähnliche Werte sind für Kupfer angegeben [44]). Die Politur übt einen stark vermindernden Einfluß auf die Strahlungszahl aus. So wurde beispielsweise für

Messing, hochpoliert	0,22

als niedrigster Wert festgestellt. Von den Nichtmetallen sollen zum Vergleich folgende Werte betrachtet werden:

Basalt, glatt geschliffen	3,4
Humus	3,1
Erde, Ackererde	1,8
Kies	1,4
Eichenholz, gehobelt [45])	4,4
Hartgummi, glatt schwarz	4,7
Serpentin, poliert	4,5
Dachpappe	4,5
Schwarzer Lack auf glänzendem Eisenblech	4,3
Kalkmörtel [46])	4,3

Wegen der immerhin guten Glätte der ausstrahlenden Flächen des Briketts soll daher

C_1 an Briketts	4,0

angenommen werden, was einer Emission von ca. 82 % der absolut schwarzen Strahlung entspricht.

Die Zahlenwerte, die die in der Formel für den Strahlungsfaktor C enthaltene Differenz $\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}$ annehmen kann, sind, da $C_s = 4{,}9$ konstant ist, nur abhängig von der Strahlungszahl C_2 des bestrahlten Körpers. Hierfür kommen hauptsächlich oxydiertes Schmiedeeisen, Holz, Kalkmörtel, Brikettschutt und dergleichen in Frage, deren Strahlungszahlen etwa zwischen

$$C_2 = 4 \text{ bis } 4{,}5$$

liegen. Bei Schmiedeeisen als bestrahltem Körper würde betragen

$$\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s} = \frac{1}{4{,}3} - \frac{1}{4{,}9} = 0{,}232 - 0{,}204 = 0{,}028.$$

---

[44]) Jürgens, Der Wärmeübergang an einer ebenen Wand, Verlag Oldenbourg, Berlin 1924, S. 37.

[45]) Schmidt, Wärmestrahlung technischer Oberflächen bei gewöhnlicher Temperatur, Verlag Oldenbourg, Berlin 1927, Seite 18.

[46]) Wamsler, Die Wärmeabgabe geheizter Körper an Luft, Verlag Straub, München 1909, S. 40.

Das Verhältnis der Flächen $F_1 : F_2$ ist abhängig von dem Abstand e einer gleichmäßig umhüllend angenommenen Fläche (vgl. Abb. 25). Der Umfang des Brikettstranges ist

$$U_1 = 0{,}43 \text{ m (gemessen).}$$

Der Umfang eines Kanals im Abstand e von den ebenen Flächen ist

$$U_2 = 0{,}48 + 8e.$$

Bei gleichen Längen des Stranges und Kanals ist

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{0{,}43}{0{,}43 + 8e}$$

$$e = 0{,}054 \cdot \frac{F_2}{F_1} - 0{,}06 \text{ (m).}$$

$\frac{F_1}{F_2}$	0,01	0,025	0,05	0,1	0,25	0,5
e	5,34	2,10	1,02	0,48	0,156	0,048

Siehe hierzu Abb. 26. Auf der Abszisse sind die Zahlenwerte von $F_1 : F_2$, auf der Ordinate ist der jeweilige Abstand e eingetragen. Man

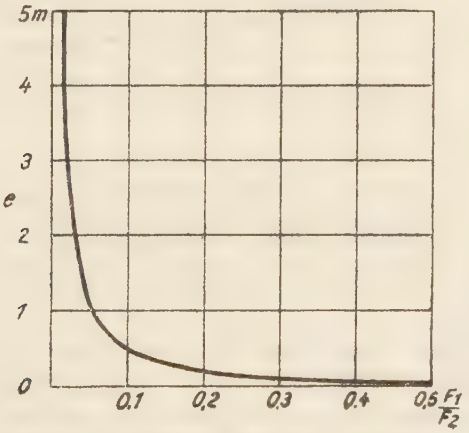

Abb. 26. Beziehung zwischen Abstand e der Umhüllung eines Brikettstranges und Flächenverhältnis $\frac{F_1}{F_2}$.

kann entnehmen, daß in einem Holzkanal beispielsweise, dessen Innenflächen 15 cm Abstand vom Brikettstrang haben, das Flächenverhältnis $F_1 : F_2 = 0{,}25$ betragen würde, in einem Kühlschrank mit dem Abstand von ca. 50 cm würde es zu 0,1 einzusetzen sein. Bei einem sehr großen F_2 gegenüber F_1 verringert sich der Summand

$$\frac{F_1}{F_2} \cdot \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}\right)$$

soweit, daß der Strahlungsfaktor praktisch

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}\right)} = C_1$$

wird. Nähert sich $F_1 : F_2$ der Zahl 1, so nimmt der Strahlungsfaktor den Wert

$$C = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_s}$$

an, der dem Fall der gegenseitigen Bestrahlung zweier paralleler Flächen entspricht [47]).

Auf Abb. 27 sind die Werte von C auf der Ordinate abzulesen. Die Abszisse trägt die Zahlenwerte des Verhältnisses $F_1 : F_2$. Für die Werte

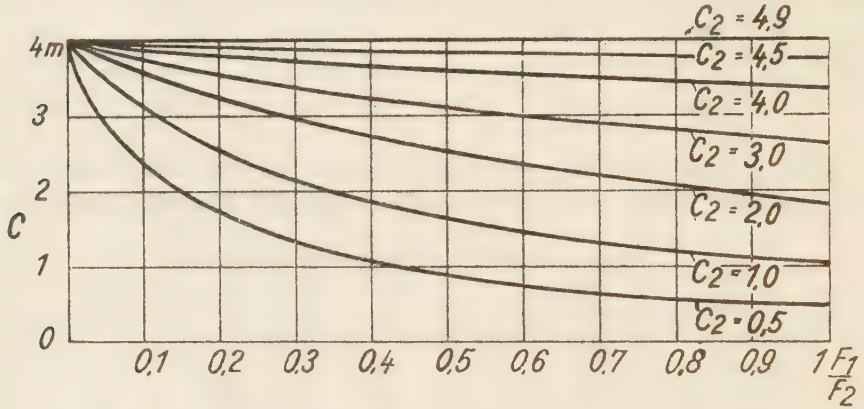

Abb. 27. Beziehung zwischen Flächenverhältnis $\frac{F_1}{F_2}$. Strahlungszahl C_2 des bestrahlten Körpers und Strahlungsfaktor C.

von C_2 beginnend mit 0,5 bis zur Annäherung an $C_2 = C_s = 4{,}9$ sind Kurven eingetragen.

Es ist aus dieser Darstellung ersichtlich, daß im Bereich der Kurven $C_2 = 4{,}0$ bis 4,5 die Größe von $F_1 : F_2$ nahezu bedeutungslos ist. Es erübrigt sich also, genaue Betrachtungen darüber anzustellen, welche Größe für e praktisch einzusetzen ist. Der Strahlungsfaktor C beträgt hiernach

$$C = 3{,}5 \text{ bis } 4.$$

Zu beachten ist jedoch der Einfluß, den die Strahlungszahl des bestrahlten Körpers, also der Zahlenwert von C_2 auf den Strahlungsfaktor, und damit schließlich auf den Wärmeübergang (α_s und α) ausübt. Glatte spiegelnde Flächen, welche die Wärme reflektieren, anstatt sie aufzunehmen, würden, namentlich in der Nähe des Brikettstranges, eine starke Verminderung des Strahlungsfaktors hervorrufen. Sie sind daher, wenn die Abkühlung in ruhender Luft geschieht, zu vermeiden, denn bei schlechtem

[47]) Gröber, Wärmeübertragung, a. a. O., S. 126. ten Bosch, a. a. O., S. 23.

Wärmeübergang haben schon geringe Veränderungen der Wärmeübergangszahl beachtlichen Einfluß auf die Abkühlungsgeschwindigkeit. Die meist unter den Kühlrinnen liegenden Brikettspäne ($C_2 \cong 4{,}0$) absorbieren mehr ausgestrahlte Wärme, sind also für die Abkühlung der Brikettstränge günstiger als Kies, dessen Strahlungszahl zu $C_2 = 1{,}4$ angegeben wird. Man beachte das Absinken der Kurven für $C_2 = 1{,}0$ und 0,5 in Abb. 27 gegenüber den Werten von C.

Für die Berechnung des Temperaturfaktors

$$a = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4}{T_1 - T_2}$$

sind in der einschlägigen Literatur Schaubilder vorhanden [48]). Die für die Abkühlung des Brikettstranges etwa in Frage kommenden Werte von a

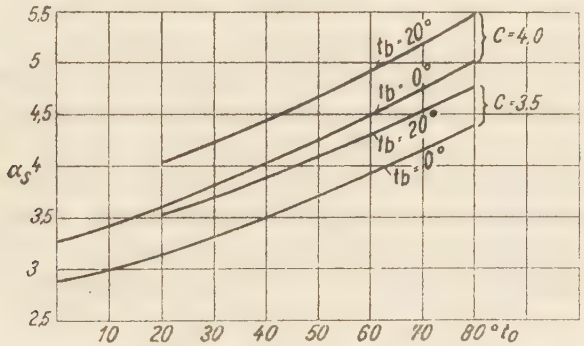

Abb. 28. Beziehung zwischen Temperatur der Oberfläche t_o, Strahlungsfaktor C, Temperatur der Umgebung t_b und Strahlungsanteil α_s der Wärmeübergangszahl.

wurden dort entnommen, und zwar für Abkühlung in einer Umgebungstemperatur von $t_b = 20\,°$ und $t_b = 0\,°$. Durch Multiplikation mit C ergab sich der Strahlungsanteil α_s der Wärmeübergangszahl α. Er ist für $C = 3{,}5$ und $C = 4{,}0$ berechnet und auf Abb. 28 graphisch dargestellt.

Es würde danach bei einem Strahlungsfaktor $C = 4{,}0$, einer Temperatur der Brikettoberfläche $t_o = 65\,°$ und einer Umgebungstemperatur $t_b = 20\,°$ betragen

$$\alpha_s = 5{,}1.$$

Mit der Senkung von t_o vermindert sich α_s, so daß bei einer Oberflächentemperatur von 20 ° betragen würde

$$\alpha_s = 4{,}0.$$

---

[48]) ten Bosch, a. a. O., S. 32, 33. Gröber, Wärmeübertragung, a. a. O., S. 127.

Die Wärmeübergangszahl durch Strahlung hat also gegen Ende der Abkühlung eine Einheit weniger als zu Beginn. Daß der Zahlenwert von α_s, selbst nachdem die Oberfläche die Temperatur der Umgebung angenommen hat, noch 4,0 beträgt [49]), ist eine Bestätigung der am Eingang erwähnten Vorstellung der Wärmestrahlung. Sie findet, streng genommen, nicht an der Oberfläche statt, sondern die aus dem Inneren von höherer Temperatur kommenden Wärmestrahlen durchdringen die Oberfläche, die bereits an die Umgebungstemperatur angeglichen sein kann.

Aus den unteren, in Abb. 28 für $t_b = 0°$ eingezeichneten Kurven ist ersichtlich, daß der absolute Strahlungsanteil α_s der Wärmeübergangszahl bei vergrößerter Temperaturdifferenz etwas geringer ist. Bei $t_o = 65°$ beträgt

$$\alpha_s = 4{,}6,$$

bei $t_o = 0°$

$$\alpha_s = 3{,}3.$$

Dies betrifft jedoch nur die Wärmeübergangszahl, die die abgegebene Wärmemenge pro 1° Temperaturgefälle angibt. Die tatsächliche Wärmemenge ist bei größerem Temperaturgefälle selbstverständlich größer.

Die unteren Kurven in Abb. 28 gelten für $C = 3{,}5$. Sie verlaufen um etwa eine halbe Einheit von α_s tiefer als die $C = 4{,}0$ Kurven.

Zusammenfassend kann aus den Betrachtungen über die Wärmestrahlung des abkühlenden Brikettstranges entnommen werden, daß der auf Strahlung entfallende Anteil α_s der Wärmeübergangszahl zu

$$\alpha_s = \text{ca. } 3{,}5 \text{ bis } 4{,}5$$

in die Abkühlungsgesetze einzusetzen ist. Eine absolute Genauigkeit ist ihm bei den mancherlei getätigten Annahmen und Schätzungen nicht zuzusprechen. Für die Praxis kann jedoch mit diesem Wert gerechnet werden, zumal er durch die Versuchsbeobachtungen [50]) bestätigt wird, wie aus dem nächsten Kapitel hervorgeht.

b) Wärmeleitung und Konvektion.

Dieser Anteil der Wärmeübergangszahl ist je nach dem Aggregatzustand des den abkühlenden Körper umgebenden Mediums — ob Luft oder eine Flüssigkeit — und nach seinem Bewegungszustand den stärksten Ver-

---

[49]) Vgl. die Tabelle von Eberle, ten Bosch, a. a. O., S. 168.

[50]) Bei den ersten Versuchsauswertungen war der Wert von α bei Abkühlung in ruhender Luft aus Hütte, Band I 1925, S. 45 zu $\alpha = $ ca. 5 entnommen worden. Es gelang nicht, die beobachteten t_m Kurven hiermit in Einklang zu bringen. Sie deuteten bei Einsatz der für γ, c und λ ermittelten Werte stets auf $\alpha = $ ca. 9 hin, was bei dem großen Einfluß, den α bei niedrigen Werten auf den Verlauf der Kurve hat, eine starke Abweichung ergab. Vgl. Abb. 32, Versuch VIa. Schließlich wurde die Wärmestrahlung berücksichtigt, und gefunden, daß α tatsächlich = ca. 9 ist.

änderungen unterworfen. Für die vorliegenden praktischen Zwecke können andere geringfügige Einflüsse auf die Größe der Wärmeübergangszahl vernachlässigt werden, so z. B. der Einfluß der absoluten Temperatur und der Rauhigkeit der wärmeabgebenden Wand. Auch die Probleme über die Grenzschicht und den Temperaturverlauf in ihr, also über den Begriff „mittlere Flüssigkeitstemperatur", scheiden für unsere Untersuchungen aus: Es genügt die Messung der Umgebungstemperatur außerhalb der Grenzschicht. Die Form der im Wärmeaustausch stehenden Wand spielt insofern eine Rolle, als starke Krümmung den Wärmeübergang erhöht; dies bleibt jedoch für die hier in Betracht kommenden Krümmungen ohne praktische Bedeutung.

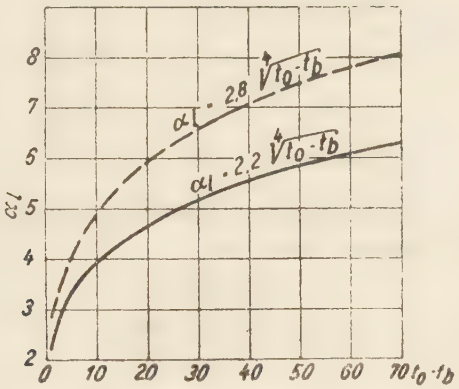

Abb. 29. Beziehung zwischen Temperaturgefälle $t_o - t_b$ und Wärmeübergangszahl α in ruhender Luft.

Bei dem Wärmeübergang an ruhende Luft ist der auf Wärmeleitung und natürliche Konvektion entfallende Betrag α_l der WÜZ α abhängig von dem Temperaturgefälle und von der Lage der wärmeabgebenden Wand. Die von Nusselt und Hencky aufgestellten Formeln lauten [51])

für vertikale Flächen $\quad 2{,}2 \cdot \sqrt[4]{t_o - t_b}$;

für horizontale Flächen $\quad 2{,}8 \cdot \sqrt[4]{t_o - t_b}$.

Daß der Wärmeübergang an einer horizontal gelagerten Platte besser ist, als der an einer vertikalen, ist natürlich, da an der horizontalen Fläche eine bessere Konvektion durch das Aufsteigen angewärmter Luftteilchen stattfindet. Die Versuche von Hencky [52]) erstreckten sich jedoch nur auf die Wärmeabgabe der oberen Fläche einer Platte. Bei einem horizontal gelagerten Salonbrikett ist man im gleichen Maße auf den Wärmeaustausch der unteren Fläche angewiesen, und es ist zu vermuten, daß dort eine

[51]) ten Bosch, a. a. O., S. 170.

[52]) Hencky, Zeitschrift für die gesamte Kälteindustrie 1915, S. 79.

schlechtere Wärmeströmung stattfindet. Daher soll im Mittel mit der Formel

$$\alpha_l = 2{,}2 \cdot \sqrt[4]{t_o - t_b}$$

gerechnet werden. Die Werte von α sind aus Abb. 29 ersichtlich. Zum Vergleich sind auch die Werte von $\alpha_l = 2{,}8 \cdot \sqrt[4]{t_o - t_b}$ punktiert eingetragen.

Die Temperatur der Oberfläche t_o des Brikettstranges und das jeweilige Temperaturgefälle zur Umgebung können aus Abb. 5 entnommen werden. Danach beträgt

	Das Temperaturgefälle $t_o - t_b$	Die WÜZ α_l
zu Beginn der Abkühlung	ca. 45°	5,7
nach $^1/_2$ Stunde	29	5,1
nach 1 Stunde	23	4,8
nach $1^1/_2$ Stunden	19	4,6
nach 2 Stunden	16	4,4

Für die in der Praxis üblichen Kühlzeiten von ½ bis 2 Stunden ist demnach mit einem mittleren Wert von

$$\alpha_l = 4{,}5 \text{ bis } 5{,}5$$

zu rechnen. Vermehrt um den Strahlungsanteil

$$\alpha_s = 3{,}5 \text{ bis } 4{,}5$$

würde die Wärmeübergangszahl α für Abkühlung in ruhender Luft betragen

$$\alpha = 8 \text{ bis } 10.$$

Dies wird später durch die Versuche bestätigt.

Höhere Werte von α entstehen bei künstlicher Konvektion oder Wärmeströmung, indem die mit Wärme beladene Luft willkürlich abgesaugt oder fortgeblasen wird. Über die Erhöhung des Wärmeaustausches durch einen an einer gewalzten Kupferplatte entlang geblasenen Luftstrom liegen die Versuche von Jürges[53]) vor, deren zahlenmäßige Auswertung in Abb. 30 wiedergegeben ist. Danach ist α_l eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit w; bei ruhender Luft ist $\alpha_l = 5$, bei einer Geschwindigkeit von 25 m/sec würde $\alpha_l = 75$ betragen. Dies gilt für ein Temperaturgefälle von ca. 30 °, entspricht also den am Brikettstrang vorliegenden Verhältnissen.

Leider wurden in der Literatur Angaben über die Größe der Wärmeübergangszahl bei einem gegen die abkühlende Platte gerichteten Luftstrom nicht aufgefunden; daß bei dieser Anordnung jedoch ein intensiverer Wärmeaustausch zu erwarten ist, ist eine bei der Konstruktion von Röhrenkesseln vielfach nutzbar gemachte Erfahrungstatsache und geht auch aus

[53]) Jürges, a. a. O., S. 4.

den einschlägigen Berechnungen der WÜZ an Rohren bei senkrecht zur Rohrachse gerichteter Strömung hervor[54]).

Für den Wärmeübergang einer ebenen Wand an ruhendes Wasser werden folgende Zahlen gegeben:

$$\alpha = \quad 400 \text{ bis } 2000\ ^{55}),$$
$$\alpha = \text{ca. } 500 \text{ bis } 3000\ ^{56}).$$

Diese Angaben schwanken in verhältnismäßig weiten Grenzen, doch beeinträchtigt dies nicht die vorliegenden Untersuchungen, worauf schon mehrfach hingewiesen wurde. Es ist daher unnötig, genauere Berechnungen anzustellen und eine etwaige Strömungsgeschwindigkeit des Wassers in

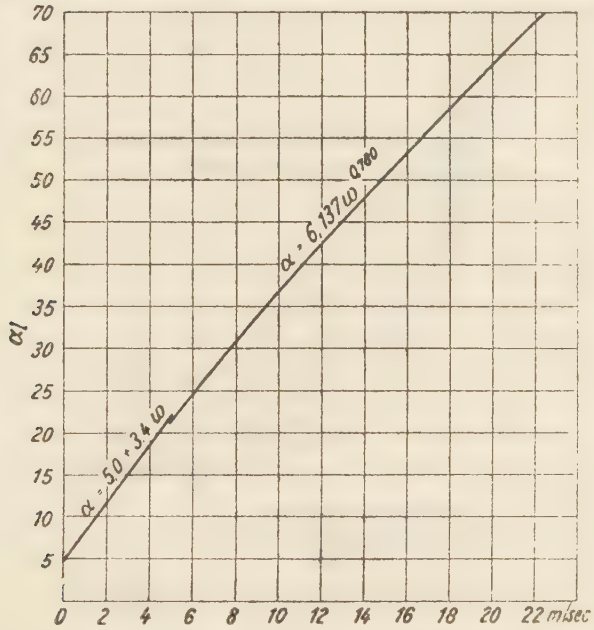

Abb. 30. Beziehung zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Wärmeübergangszahl α_l bei vorbeistreichender Luft an einer Platte (nach Jürges).

Betracht zu ziehen. Sollte eine Abkühlung in Wasser praktisch in Frage kommen, so steht fest, daß es für die Abkühlungsgeschwindigkeit der Briketts gleichgültig ist, ob das Wasser sich in Ruhe oder in Strömung befindet. Eine Berücksichtigung der Wärmestrahlung kommt im Wasser nicht in Betracht.

Es geht aus diesen theoretischen Erwägungen hervor, daß die Wärmeübergangszahl bei der Abkühlung von Briketts Zahlenwerte zwischen $\alpha = 8$ und $\alpha = 3000$ annehmen kann.

---

[54]) ten Bosch, a. a. O., S. 129 und folgende.

[55]) Geiger-Scheel, Handbuch der Physik, Band XI, Thermodynamik; Verlag Springer, 1926; S. 135.

[56]) Hütte, 1925, Band I, S. 459.

In den Gesetzen der abklingenden Temperaturverteilung ist α ein Faktor der Kenngröße M

$$M = \frac{\alpha \cdot H}{\lambda}.$$

Bei $H = 0{,}03$ und $\lambda = 0{,}23$ befindet sich daher M zwischen 1,04 und 400. Daß bei dem parallelen Verlauf der Kurven im rechten Teil der Schaubilder Vergrößerungen von M über 50 hinaus kaum noch Einfluß auf die Abkühlungsgeschwindigkeit ausüben, ist schon mehrfach erwähnt worden. Da die Ablesung der Temperaturquotienten bei $M = 52$ nach den Zahlentafeln und Schaubildern von Gröber noch einen genauen Wert ergab

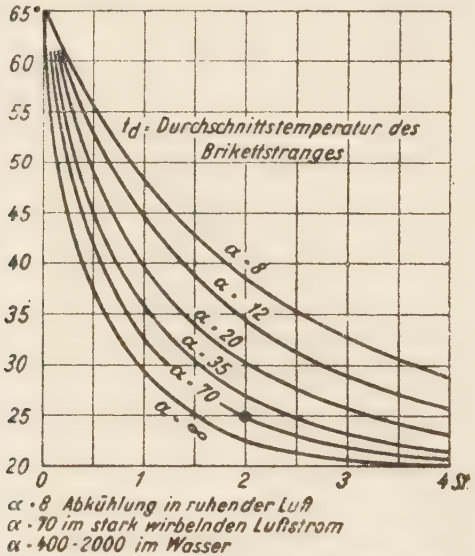

Abb. 31. Einfluß der Wärmeübergangszahl auf die Abkühlung des Brikettstranges.

und im besonderen noch die Bestimmung der Temperatur der Oberfläche ermöglichte, wurde für die ersten allgemeinen Darstellungen des Temperaturverlaufes bei Abkühlung in Wasser der entsprechende Wert $\alpha = 400$ angenommen.

Die geneigte Lage der Kurven in der linken Hälfte der Schaubilder bewirkt, daß Änderungen an einer niedrigen WÜZ zunächst sichtbaren Einfluß auf den Abkühlungsverlauf des Brikettstranges haben, während sie an einer an sich hohen WÜZ nahezu wirkungslos bleiben. Dies wird am besten durch die Abb. 31 veranschaulicht. Dargestellt ist der Verlauf der Durchschnittstemperaturen t_d im Brikettstrang bei $\alpha = 8$, 12, 20, 35, 70 und ∞.

Es geht hervor, daß man bei natürlicher Kühlung des Brikettstranges in ruhender oder leicht durch Wind bewegter Luft ($\alpha = 8$ bis 12) von 20 °

selbst bei einem zweistündigen Verbleiben im Kühlschrank nur Durchschnittstemperaturen von 35 bis 37 ° erreichen kann, während bei $\alpha = 70$ eine Herabminderung auf 23 °[57]) und bei $\alpha =$ ca. 600 auf 20 ° möglich wäre. Andererseits ist klar, daß man auch bei dem besten Wärmeübergang ($\alpha = \infty$) mit Kühlzeiten von ca. 2 Stunden rechnen muß, um eine Angleichung der Brikettemperatur bis auf etwa 2 ° an die Tagestemperatur zu erzielen.

Diese Kühlzeit von ca. 2 Stunden wird in den üblichen Kühlschränken, in denen meist 12 Kühlrinnen zu einer Batterie vereinigt sind, erreicht. Ist

die Pressendrehzahl	n	= 90 Umdr./Min.,
die Brikettstärke	S	= 0,045 m,
die Anzahl der Kühlrinnen	a	= 12,
die beabsichtigte Kühlzeit	z	= 120 Min.,

so ist die erforderliche Länge des Kühlschrankes

$$L = \frac{n \cdot S \cdot z}{a} = \frac{90 \cdot 0{,}045 \cdot 120}{12} = 40 \text{ m}.$$

Bei einer Pressendrehzahl von n = 132 Umdr./Min. würde betragen

$$L = \frac{132 \cdot 0{,}045 \cdot 120}{12} = 60 \text{ m}.$$

Eine Länge von 40 bis 60 m gewährleistet also die erforderliche Kühlzeit von 2 Stunden im Kühlschrank.

Zur Ermittlung der Wärmeübergangszahlen wurden eine Anzahl Versuche ausgeführt, die dabei gleichzeitig die Richtigkeit der anderen ermittelten Stoffwerte, im besonderen der Wärmeleitzahl, bestätigten.

Auf Abb. 32 sind die Temperaturmessungen eines solchen Versuches dargestellt. Bei diesem wurde die Abkühlung von 3 Brikettwürfen nach der in Abb. 20 dargestellten Anordnung beobachtet, und zwar

VIa in ruhender Luft,
VIb in leicht bewegter Luft, im offenen Fenster des Laboratoriums unter gleichzeitiger Benetzung mit der Spritzflasche,
VIc im Wasser.

Um die Einwirkung der von den gewölbten Seitenflächen der Briketts ausgehenden zusätzlichen Erkaltung auf die Messung einzuschränken, wurden die Bohrlöcher bei den Versuchen in Luft 90 mm tief gebohrt, sodaß sich das Quecksilber des Thermometers im Brikettmittelpunkt befand, bei

---

[57]) Die t_d-Kurven der Abb. 31 sind durch Addition der t_d-Werte der Platte und des Zylinders erhalten. Wie auf Seite 28 bemerkt, ist bei gutem Wärmeübergang der tatsächliche Wert nach zweistündiger Abkühlung um 1 bis 2 ° geringer. Oben wurden bereits die verringerten Zahlen genannt.

den Versuchen im Wasserbad wurde das Thermometer nur 80 mm tief eingesteckt (vgl. S. 42).

Um nun die für jeden Versuch gültige Wärmeübergangszahl zu ermitteln, errechnete man bei den ersten Versuchen einige t_m-Kurven für die Platte mit den voraussichtlich geltenden Werten von α theoretisch und zeichnete sie neben die Versuchswerte ein. So ist aus Abb. 32 ersichtlich, daß bei Versuch VIa ein Wärmeübergang von $\alpha =$ ca. 9 vorgelegen hat, denn die Versuchswerte liegen zwischen t_m bei $\alpha = 8$ und $\alpha = 10$. Bei der Berechnung dieser Kurven wurden die bei diesem Versuch geltenden Werte von $2\,H = 62$ mm, $t_a = 69{,}0\,^0$, $t_b = 23{,}5\,^0$ eingesetzt.

Man kann jedoch die WÜZ, die bei einem beobachteten Abkühlungsverlauf vorgelegen hat, direkt ermitteln, ohne erst eine Übereinstimmung mit benachbarten Kurven zu probieren. Aus dem beobachteten Wert von

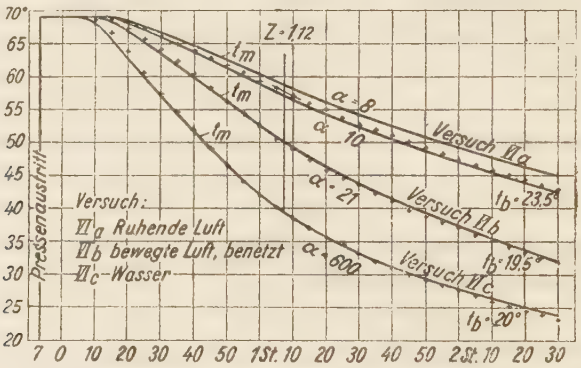

Abb. 32. Versuch VI.

t_m zu einem bestimmten Zeitwert z kann die Überschußtemperatur T_m durch Subtraktion der Temperatur der Umgebung t_b berechnet werden.

$$T_m = t_m - t_b.$$

Da T_c als Differenz der Anfangstemperatur t_a und der Umgebungstemperatur t_b bekannt ist,

$$T_c = t_a - t_b,$$

so kann auch der dem Zeitwert z entsprechende Temperaturquotient

$$\frac{T_m}{T_c} = \Phi_m(M, N)$$

berechnet werden. Dem Zeitwert z entspricht ein bestimmter Wert der Kenngröße N; bei den bei Versuch VIa geltenden Werten ist

$$N = \frac{\lambda \cdot z}{c \cdot \gamma \cdot H^2} = \frac{0{,}23 \cdot z}{0{,}466 \cdot 1150 \cdot 0{,}031 \cdot 0{,}031} = 0{,}466 \cdot z.$$

Wird also beispielsweise $z = 1{,}12 \cdot h$ gewählt, so ist

$$N = 0{,}446 \cdot 1{,}12 = 0{,}5.$$

Es ist also auf dem Schaubild (Abb. 3) die für die Abkühlung der Plattenachse geltende langgestrichelte Kurve von $N = 0{,}5$ zu verfolgen und der

dem berechneten Temperaturquotienten $\frac{T_m}{T_c}$ zugehörige Wert der Kenngröße M auf der Abszisse abzulesen.
Aus

$$M = \frac{\alpha \cdot H}{\lambda},$$

folgt

$$\alpha = \frac{M \cdot \lambda}{H}.$$

Bei Versuch VIa z. B. betrug

$$T_c = t_a - t_b = 69{,}0^0 - 23{,}5^0 = 45{,}5^0$$

bei $z = 1{,}12$ ist nach Abb. 32, Versuch VIa $t_m = 57{,}9\,^0$.

$$T_m = t_m - t_b = 57{,}9^0 - 23{,}5^0 = 34{,}4^0$$

$$\frac{T_m}{T_c} = \frac{34{,}4}{45{,}5} = 0{,}755.$$

Die 0,5 N-Kurve hat den Wert 0,755 bei $M = 1{,}23$ (Abb. 3).

$$\alpha = \frac{M \cdot \lambda}{H} = \frac{1{,}23 \cdot 0{,}23}{0{,}031} = 9{,}1.$$

Für Versuch VIb wurde auf diese Weise berechnet $\alpha = 21{,}2$.

Die Wahl desjenigen Wertes von z, der der Kenngröße $N = 0{,}5$ entspricht, geschah, da der Abkühlungsgrad der Plattenachse etwa 1 Stunde nach Beginn der Abkühlung ($1{,}12 \cdot h =$ 1 Stunde 7,2 Minuten) am wenigsten etwaigen Meßfehlern unterworfen zu sein schien. Die bei den Versuchen registrierten t_m-Kurven zeigten zu Beginn der Abkühlung vielfach etwas höhere Werte, als die rechnerisch bestimmten, namentlich bei schneller Abkühlung, wie aus den Versuchswerten VIc auf Abb. 32 gegenüber der mit $\alpha = 600$ rechnerisch ermittelten Kurve hervorgeht. Vermutlich folgte das Thermometer den sinkenden Temperaturen nicht schnell genug. Gegen Ende des beobachteten Zeitraumes, etwa von 1½ Stunden ab, senkte sich die Versuchskurve meist etwas stärker, als die rechnerisch ermittelte.

Bei diesem Versuch stimmte die auf S. 62 rechnerisch ermittelte Zeitspanne von 7 Minuten, die zur Abfuhr der Randwärme vor Erreichung einer gleichmäßigen Anfangstemperatur benötigt wird, mit dem Versuchsergebnis gut überein. Man beachte die Vorgabe von 7 Minuten vor dem Zeitpunkt $z = 0$. Diese Größe schwankte mitunter. Es wurde daher bei fast allen Versuchen, die zur Bestimmung einer mittleren WÜZ dienten, zum Vergleich je ein Brikettwurf in ruhender Luft und meist auch in Wasser mit beobachtet. Die t_m-Kurven wurden auf Pauspapier mit mm-Teilung eingetragen. Dann wurde ein Papier untergeschoben, auf dem die Temperatur-Zeitkurven unter ähnlichen Bedingungen entworfen waren, und der obere Krümmungspunkt der Kurven wurde in Einklang gebracht. Hierbei

schwankte die vor dem eigentlichen Nullpunkt überschießende Spanne zuweilen zwischen 5 und 9 Minuten; meist paßte jedoch der oben errechnete Wert von 7 Minuten. Nachdem auf diese Weise der Punkt für $z = 0$ festgelegt war, konnte der der Kenngröße $N = 0{,}5$ entsprechende Wert von t_m zur Ermittlung von α abgelesen werden. Vergleiche Zusammenstellung der Versuche VI bis XV S. 106. Mit diesem Wert von α wurde die Kurve nachgerechnet und die Übereinstimmung kontrolliert.

Die ausgeführten Versuche lassen sich folgendermaßen gruppieren:

a) Abkühlung in ruhender Luft. Die Brikettwürfe wurden mit dem eingesteckten Thermometer auf einem Tisch im Laboratorium aufgestellt oder in einer eisernen Kühlrinne beobachtet (Abb. 33). Der Wärmeübergang betrug $\alpha = 8{,}8—10$.
Diese Zahl entspricht also praktisch der Abkühlung bei Windstille.

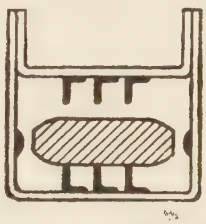

Abb. 33. Kühlrinne.

b) Abkühlung in schwach bewegter Luft. Dabei wurden die Brikettproben auf dem Fabrikhof oder im geöffneten Fenster aufgestellt. Es ergab sich $\alpha = 9—12$.
Wurde der Brikettwurf im geöffneten Fenster quer aufgehängt, sodaß der Zugwind gegen eine volle Breitseite gerichtet war, so betrug $\alpha = 15{,}5$.
In der Praxis wird man bei den üblichen Windverhältnissen ungefähr mit diesen Zahlen rechnen können. Zwar beschränken die Trag- und Führungseisen der Kühlrinnen die Einwirkung des Windes in voller Stärke auf den Brikettstrang; es wird jedoch um die Brikettoberfläche ein Wirbel entstehen, sodaß der letztgenannte Zahlenwert von α wohl praktisch zeitweilig erreicht wird.

Nach der Zahlentafel von Jürges (Abb. 30) hat eine Windgeschwindigkeit von 2 m/sec einen Wärmeübergang $\alpha_l = 11{,}5$. Unter Berücksichtigung der Strahlung ($\alpha_s = 3{,}5$ bis $4{,}5$) würde also ein mit 2 m/sec am Brikettstrang entlangstreichender Windstrom einen Wärmeaustausch mit $\alpha = 15$ bis 16 erzeugen.

c) Abkühlung in leicht bewegter Luft mit Benetzung. Wurden die am geöffneten Fenster aufgestellten Brikettproben mit der Spritzflasche benetzt, so konnte eine beachtliche Verbesserung des Wärmeüberganges festgestellt werden. $\alpha = 21—22$.

Die Benetzung bewirkte außerdem noch eine Temperaturerniedrigung der das Brikett umgebenden Luft um 3 bis 4 ° (vgl. Seite 106; bei Versuch VIa, $t_b = 23{,}5$ °, bei Versuch VIb, $t_b = 19{,}5$ °). Man würde also damit rechnen können, bei Benetzung des Brikettstranges durch den Einfluß der um etwa 4 ° verringerten Umgebungstemperatur die Durchschnittstemperatur des Brikettstranges nach ½-stündiger Kühlung um ca. 1 °, nach 2-stündiger Kühldauer um ca. 3 ° zusätzlich herabsetzen zu können. Vgl. hierüber S. 67 und Abb. 24.

d) Abkühlung im entlangstreichenden Luftstrom. Es wurde ein ca. 2 m langer hölzerner Kanal hergestellt, ähnlich wie in Abb. 25 im Maßstab 1 : 10 dargestellt, durch den ein Luftstrom geblasen wurde. Die Briketts ruhten mit dem Rande der gewölbten Seitenflächen auf den oberen Kanten zweier in Längsrichtung aufgestellter Bretter. Abgesehen von diesen schmalen Auflageflächen wurde der Brikettstrang allseitig von dem entlangstreichenden Wind berührt. Die Messung der Geschwindigkeit des Luftstromes geschah mit dem Anemometer. Bei 3,6 m/sec betrug $\alpha = 22{,}2$. Dies stimmt mit Abb. 30 überein. $\alpha_l = 17$; demnach $\alpha = \alpha_l + \alpha_s = 17 + 4 = 21$.

Bei 6,3 m/sec wurde festgestellt: 28,4. Nach Abb. 30: $\alpha_l = 25{,}5$; $\alpha = 25{,}5 + 4 = 29{,}5$.

Diese Versuche ließen also eine praktisch gute Übereinstimmung mit den von Jürges (vgl. S. 76) gegebenen Zahlenwerten von α_l feststellen. Dies ist ein Beleg für die allgemeine Richtigkeit der benutzten und ermittelten Zahlenwerte.

Man würde also durch einen mit großer Geschwindigkeit am Brikettstrang entlangstreichenden Windstrom eine wesentliche Verbesserung des Wärmeaustausches hervorrufen können. Bei einer Steigerung der Geschwindigkeit bis auf 18 bis 20 m/sec müßte die erstrebte WÜZ $\alpha = 60$ bis 70 erreicht werden, deren Wirkung nach Abb. 31 der Abkühlung im Wasser ($\alpha = 400$ bis 3000) nahezu gleichkommt. Praktisch werden jedoch die Profileisen der Kühlrinnen diesen Erfolg verhindern, da sie den Windstrom oftmals brechen, er an Geschwindigkeit verlieren und den bequemeren Weg außerhalb der Kühlrinnen wählen wird. Es müßten also innerhalb des Kühlschrankes besondere Einrichtungen getroffen werden, die im Zusammenhang mit dem nächsten Versuch vorgeschlagen werden (S. 97).

e) Abkühlung mit gegen die Breitseiten des Brikettstranges quer gerichteten Luftströmen. Bereits aus den unter b angeführten Versuchen ging eine Erhöhung des Wärmeüberganges beim Anprall des Luftzuges gegenüber entlangstreichendem Wind hervor. Um die WÜZ praktisch zu erforschen, wurde folgender Versuch gemacht: Zwei kleine Zimmerventilatoren von ca. 300 mm Flügelraddurchmesser wurden in 70 cm Abstand einander gegenüber auf einen Tisch montiert, sodaß sie den da-

zwischen in der Mitte aufgestellten Brikettwurf von beiden Seiten anbliesen. Die Geschwindigkeit der Luftströme, die vor Aufstellung des Brikettstranges einzeln gemessen wurde, betrug im Mittel 4 m/sec. Der Abkühlungsverlauf vollzog sich nach $\alpha = 34—36$. Bei parallel zur Oberfläche des Brikettstranges gerichtetem Luftstrom hätte nach Abb. 30 bei 4 m/sec betragen

$$\alpha_l = 18{,}5; \quad \alpha_l + \alpha_s = 22{,}5.$$

Es war also eine 1,6fache Erhöhung der WÜZ durch die gegen den Brikettwurf gerichteten Luftströme und die ihn umgebende Wirbelung eingetreten. Diese Feststellung soll später bei der Aufstellung eines Entwurfes zur künstlichen Kühlung benutzt werden.

f) Abkühlung im entlangstreichenden Luftstrom bei Benetzung und Berieselung. Wurde bei der unter d beschriebenen Versuchsordnung gleichzeitig eine Benetzung oder maschinelle Berieselung vorgenommen, so konnte eine weitere Verbesserung der Wärmeabgabe festgestellt werden. Bei einer Windgeschwindigkeit von 3,6 m/sec betrug

bei Benetzung mit der Spritzflasche $\alpha = 29$,

bei Berieselung durch über und unter dem Strang angebrachte durchlöcherte Rohre $\alpha = 35—38$,

bei Steigerung der Windgeschwindigkeit auf 5,3 m/sec und besonders starkem Bebrausen $\alpha = 66$.

g) Indirekte Kühlung durch wassergekühlte Kühlmäntel. Diese Versuche wurden aus der Erwägung unternommen, daß eine Kühlung der Briketts unter Zuhilfenahme einer direkten Berührung mit Wasser in der Praxis auf mannigfachen Widerstand stoßen wird. Auf dem Niederlausitzer Werk, auf dem die meisten Versuche stattfanden, wurde eine wesentliche Verminderung der Brikettgüte bei Berieselung oder Eintauchen in kaltes Wasser im allgemeinen nicht festgestellt[58]), jedoch bildeten sich manchmal einige Blasen in der Glanzhaut. Auf anderen Werken, die gleichfalls ein gut aussehendes Brikett herstellen, wurde teils gute Wasserbeständigkeit, teils Blasenbildung und sogar mitunter Zerfall im Wasser beobachtet. Nicht umsonst sind die Brikettrinnen auf vielen Werken gegen Regen abgedeckt. Die Untersuchungen von Fritzsche[59]) haben ergeben, daß die Kühlung von Briketts im Wasser wohl die Biegungsfestigkeit erhöhte, aber nur bei einem der Kohlensorte eigenen „optimalen" Trocknungsgrad ohne Schädigung der Briketthaut und der angrenzenden

---

[58]) Die Erwärmungsversuche zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, vgl. S. 42, in Wasser von ca. 60° erzeugten allerdings eine blasige Oberfläche.

[59]) Fritzsche, Untersuchungen über die Brikettierung von Braunkohlen unter besonderer Berücksichtigung der Wasserbeständigkeit von Braunkohlenbriketts. Braunkohlenarchiv Heft 22, S. 44.

Zonen angewendet werden kann. Die allgemeine Einführung der Wasserkühlung wird daher als fraglich beurteilt.

Um eine direkte Berührung mit dem Wasser zu vermeiden, trotzdem aber den guten Wärmeübergang an Wasser auszunutzen, wurde der Brikettstrang an den flachen und gewölbten Flächen mit wassergekühlten Mänteln umgeben. Dieser Mantel war bei dem einen Versuch aus Eisenblech von 1,5 mm hergestellt (Abb. 34), bei einem anderen Versuch wurden zwei lange Schwalbungen bis auf 8 mm Stärke abgeschliffen und mit

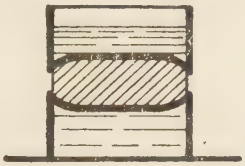

Abb. 34. Kühlmantel.

Außenwänden versehen, sodaß ebenfalls eine der Abbildung 34 ähnliche Anordnung zustande kam.

Die Wärmedurchgangszahl k, die in diesem Fall an die Stelle von α in die Gesetze eintritt, beträgt

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{D}{\lambda} = \frac{1}{\alpha_2}} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot {}^0\text{C}.$$ [60])

Es ist α_1 die WÜZ zwischen Brikett und Eisen, die bei vollkommener Berührung zu ∞ angenommen werden soll,

D die Dicke der Eisenplatte,

α_2 die WÜZ von Eisen an Wasser, ca. 1000.

Bei einer Dicke des Blechmantels von 1,5 mm ist demnach

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\infty} + \frac{0{,}0015}{50} + \frac{1}{1000}} = 970.$$

Auch die Dicke der Schwalbung von 8 mm bleibt nahezu ohne Einfluß. Es beträgt

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\infty} + \frac{0{,}008}{50} + \frac{1}{1000}} = 860.$$

Wenn es also gelingen würde, eine satte Berührung zwischen Brikettstrang und Kühlmantel herzustellen, so würde der gute Wärmeübergang an Wasser nutzbar gemacht werden können, ohne die Brikettgüte zu beeinträchtigen. Praktisch ließ sich ein widerstandsloser Wärmeübergang nicht

---

[60]) Gröber, Wärmeübertragung, a. a. O., S. 11.

ermöglichen, und die tatsächlich vorliegende Wärmedurchgangszahl erfuhr hierdurch eine mehr oder weniger starke Abschwächung.[61])

Bei der Abkühlung in dem gekühlten Blechmantel wurde festgestellt $k = 28{,}4$,

bei der Abkühlung zwischen gekühlten Schwalbungen $k = 42$.

Die Schwalbung war also in bessere Berührung mit dem Brikett gebracht worden als der Blechmantel.

Die unter annäherndem Abschluß der Außenluft gekühlten Briketts zeigten die bekannte Eigenschaft einer außerordentlich schönen und glatten Oberfläche.

Wenn auch bei einer praktischen Ausbildung dieses Verfahrens die aus alten Schwalbungen hergestellten Kühlmäntel, zwischen denen der Brikettstrang sich verschieben würde, allmählich zu einer recht guten Berührungsfläche abgeschliffen werden würden, so wird man damit doch nur Wärmedurchgangs- bez. Wärmeübergangszahlen von $k = 50$ bis 60 erzielen können. Da man aber mit wirbelnden Luftströmen den gleichen Wärmeaustausch erreicht, so wird sich aus diesem Versuch ein praktisches Verfahren wohl nicht herausbilden lassen.

h) Abkühlung im Wasser. Sie bestätigte die oben für die WÜZ $\alpha =$ ca. 600 gemachten Annahmen.

i) Zeitlich begrenzte Abkühlung im Wasser. Diese Versuche wurden veranlaßt durch die in der Literatur mehrfach erwähnten Berichte eines mitteldeutschen Werkes über die Kühlung des Brikettstranges bei Durchführung durch einen Wassertrog von 4 bis 12 m Länge.[62])

Dieser Länge $L = 12$ m würde bei einer mittleren Pressendrehzahl von $n = 90$ Umdr/min und einer Brikettstärke $S = 45$ mm eine Zeitdauer des Eintauchens entsprechen:

$$z = \frac{L}{n \cdot S} = \frac{12}{90 \cdot 0{,}045} = 3 \text{ Minuten.}$$

Wenn man annimmt, der Eintritt in den Wassertrog würde ungefähr zu dem Zeitpunkt erfolgen, an dem die Randwärme bereits an die umgebende Luft abgeführt ist, also zur Zeit $z = 0$, so kann aus der theoretischen t_m-Kurve, Abbildung 5, sowie auch aus den Versuchskurven, z. B. Abbildung 32, Versuch VIc, entnommen werden, daß die Temperatur der Brikettachse noch ca. 0,11 h = 6½ Minute unverändert auf ihrer anfänglichen Höhe bleibt. Dies beweist auch der Erwärmungsversuch Abbildung 21, bei dem etwaige Fehler einer ungleichmäßigen Temperatur-

---

[61]) Vgl. die Versuche mit Blechpaketen von Ott, Mitteilungen über Forschungsarbeiten, Berlin, Verlag Springer, Heft 35/36. Erwähnt in ten Bosch, a. a. O., S. 39/40.

[62]) Niederschrift 8, S. 4. Fritzsche, a. a. O., S. 44.

verteilung am Anfang ausgeschaltet sind. Die Ablesung bei z = 6 Minuten nach Eintauchen in das Wasserbad war noch unverändert; erst nach 8 Minuten wurde der erste Anstieg um 0,2 ° registriert.

Bei der Durchführung des Brikettstranges durch einen Wassertrog würde sich die Verbesserung des Wärmeüberganges daher nur durch eine vorübergehend geänderte Temperaturverteilung innerhalb des Briketts, hervorgerufen durch schnelles Absinken der Oberflächentemperatur, geltend machen. Auf die Temperatur der Brikettachse kann sie in der kurzen Zeit z = 3 Minuten noch nicht einwirken.

Aber auch, wenn man die Einschaltung des Wasserbades vornimmt, während der Wärmefluß schon im Gang ist, kann innerhalb 3 Minuten höchstens eine absolute Temperaturverminderung in der Brikettachse um

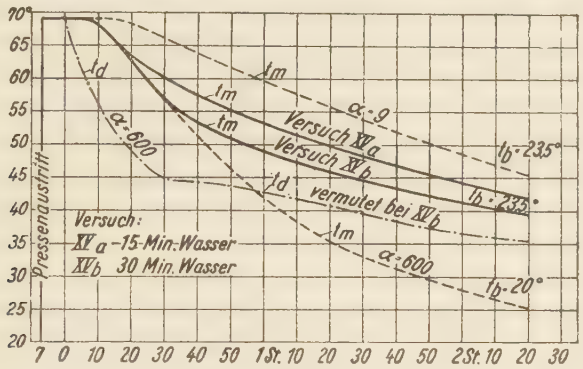

Abb. 35. Versuch XV.

1,6 ° eintreten; denn die stärkste Neigung der t_m-Kurven bei $\alpha = 400$ (Abb. 5) beträgt 8 ° in 0,25 h = 15 Minuten. Demgegenüber beträgt bei schlechtem Wärmeübergang ($\alpha = 8$, Abb. 5) die Temperaturabnahme in der Brikettachse zur Zeit des besten Wärmeflusses 3,5 ° in 15 Minuten, also 0,7 ° in 3 Minuten. Die Differenz zwischen 1,6 ° und 0,7 ° ist zu gering, als daß sie bei den Temperaturmessungen deutlich hervortreten würde. Es mußten also zu den Versuchen längere Zeiträume zum Eintauchen gewählt werden.

Bei den Versuchen XVa und XVb, die in Abbildung 35 dargestellt sind, wurde je ein Brikettwurf 15 bez. 30 Minuten lang in Wasser gekühlt. Die t_m-Kurven zeigen, daß die Abkühlung bald nach der Herausnahme aus dem Wasserbad stark verzögert weiter verlief; mit der darüber für $\alpha = 9$ punktiert eingetragenen t_m-Kurve verglichen, sogar noch langsamer als diese.

Durch Anfühlen mit der Hand wurde festgestellt, daß die Temperatur der Oberfläche, die bei der Herausnahme aus dem Wasserbad annähernd gleich der Wassertemperatur war, in ruhender Luft wieder zunahm, namentlich nach Verdunstung des anhaftenden Wassers (ca. 6 Mi-

nuten). Daraus muß aber geschlossen werden, daß sich eine andere Temperaturverteilung in dem Brikettwurf einstellte, als sie während der Berührung mit dem Wasser war. Bei der Entnahme aus dem Wasserbad hatte die Brikettplatte XVb folgende Temperaturverteilung: $t_m = 57\,^\circ$, $t_d = 44{,}5\,^\circ$ (die berechnete t_d-Kurve ist in Abb. 35 strichpunktiert eingezeichnet), $t^\circ = 21\,^\circ$. Dieses starke Temperaturgefälle ist eine Folge des guten Wärmeüberganges, bei dem die Temperatur der Oberfläche annähernd die der Umgebung ist. Vgl. Abb. 8 ($\alpha = 400$). Nach der Entnahme des Brikettwurfes aus dem Wasser liegen jedoch wesentlich andere Bedingungen für den Wärmeaustausch an der Oberfläche vor. Die Temperaturkurve innerhalb des Briketts verläuft flacher, wie dies auf Abbildung 8 links dargestellt ist. In ruhender Luft rücken die Temperaturen der Achse und der Oberfläche näher aneinander heran, wobei die Oberfläche sich erwärmt, wie dies praktisch festgestellt wurde. Daß die Temperatur der Achse $_m$ noch fällt, ist zunächst nur eine Annäherung der Temperaturen innerhalb des Briketts. Die Durchschnittstemperatur t_d wird vorerst für eine gewisse Zeit nahezu konstant bleiben. Um einen Endpunkt für die t_d-Kurve in Abbildung 35 zu bestimmen, wurde berechnet, daß beispielsweise bei $\alpha = 9$ t_d zur Zeit $z = 2{,}3$ h nur $3{,}4\,^\circ$ geringer als t_m ist Es würde also bei $z = 2{,}3$ h betragen $t_d = 35{,}5\,^\circ$. Dieser Wert ist in Abbildung 35 eingetragen, sodaß nunmehr für den Versuch XVb für t_d die Werte $44{,}5\,^\circ$ bei $z = 0{,}5$ h und $35{,}5\,^\circ$ bei $z = 2{,}3$ h festliegen. Dazwischen wurde die Kurve, wie nach den obigen Erwägungen vermutet, entworfen.

Es geht aus diesem Versuch und den angestellten Betrachtungen hervor, daß eine Durchführung des Brikettstranges durch ein Wasserbad vorübergehend wohl eine günstige Temperaturverteilung innerhalb des Briketts und eine schnellere Senkung der Durchschnittstemperatur hervorruft. Findet jedoch nach Austritt aus dem Trog die weitere Kühlung des Brikettstranges bei schlechtem Wärmeübergang statt, so geht ein Teil des erzielten Fortschrittes wieder verloren, indem die weitere Senkung der Durchschnittstemperatur eine Zeitlang gegenüber dem gewöhnlichen Verlauf verzögert wird. Wenn man hiervon absieht und annimmt, daß die Durchschnittstemperatur stets entsprechend dem veränderten Wärmeübergang verlaufen würde, so kann aus Abbildung 7 entnommen werden: In 15 Minuten beträgt zur Zeit des besten Wärmeflusses die Senkung der t_d-Kurve

bei $\alpha = 8$	$5{,}0\,^\circ$,
bei $\alpha = 400$	$18{,}0\,^\circ$,
Differenz	$13{,}0\,^\circ$.

Es würde sich also, wenn für die Durchführung durch das Wasserbad eine Zeitdauer von 5 Minuten, entsprechend einer Troglänge von

$$L = n \cdot S \cdot z = \text{ca. } 90 \cdot 0{,}045 \cdot 5 = \text{ca. } 20 \text{ m}$$

gewählt wird, damit günstigenfalls eine um 3 bis $4\,^\circ$ verbesserte Durch-

schnittstemperatur des Brikettstranges gegenüber der Abkühlung in ruhender Luft ($\alpha = 8$) erzielen lassen. Dies gilt für die den Berechnungen allgemein zugrunde gelegten Stoffkonstanten ($c = 0{,}49$; $\lambda = 0{,}23$; $\gamma = 1150$), eine Anfangstemperatur $t_a = 65\,^{\circ}$, und eine Wassertemperatur $t^b = 20\,^{\circ}$.

Die Durchführung eines Brikettstranges durch einen Wassertrog wird also nur dort Vorteile bringen können, wo eine Senkung der Verladetemperatur um einige Grad erstrebt wird; zum Beispiel, wenn man bei geschütteter Verladung mehrere Brikettstränge in einen Waggon zu leiten beabsichtigt und die schnelle Füllung des Waggons eine etwas zu hohe Verladetemperatur hervorrufen würde. Ob der Eintritt des Stranges in den Trog und der Austritt, wenn dazu eine Stopfbüchse vorgesehen wird, sowie die direkte Berührung mit dem Wasser ohne nachteiligen Einfluß auf die Brikettoberfläche bleiben, erscheint fraglich.

Man könnte daher an Hand der Abbildung 31 untersuchen, ob die gleiche Wirkung nicht auch durch Belüftung erzielt werden kann. Bei einem Wärmeübergang $\alpha = 35$ beispielsweise beträgt die stärkste Neigung

der t_d-Kurve in 15 Minuten	11 °,
dagegen bei $\alpha = 8$	5 °,
Differenz	6 °.

Für ein Wasserbad von 20 m Länge und 5 Minuten Einwirkungsdauer war oben eine Verbesserung der Abkühlung um 4 ° errechnet worden. Dieselbe würde also durch Belüften mit $\alpha = 35$ bei einer Einwirkungsdauer von 10 Minuten in einem ca. 40 m langen Kühlschrank ebenfalls erreichbar sein. Obwohl eine solche Belüftung maschinelle Betriebskosten erfordert, liegt die Vermutung nahe, daß sie dem Betriebsleiter willkommener sein würde, als die Durchführung durch einen Wassertrog.

Hier könnte auch der Vorschlag der indirekten Kühlung durch wasserbespülte Kühlmäntel nochmals berücksichtigt werden. Die direkte Berührung mit Wasser ist dabei vermieden, aber trotzdem eine Verbesserung der Wärmeabgabe erreicht. Die Länge des Kühlmantels müßte das 1,5- bis 2-fache der für den Wassertrog in Aussicht genommenen betragen.

Zusammenfassend ist über den Einfluß der Güte des Wärmeüberganges auf die Abkühlung des Brikettstranges und über die angestellten Versuche zu sagen, daß eine gegen den Brikettstrang gerichtete wirbelnde Belüftung als das aussichtsvollste Kühlmittel erscheint. Wenn hierbei mit kleinen Zimmerventilatoren Wärmeübergangszahlen von $\alpha =$ ca. 35 erreicht wurden, so ist bei größerer Ausgestaltung eine weitere Erhöhung zu erwarten. Hat man aber einen zwischen 35 und 70 liegenden Wert von α erreicht, so bedeutet dies schon annähernd die Grenze der möglichen

Schnellkühlung. Auch Kühlung in Wasser würde dagegen nur noch einen Vorteil um 2 bis 3 ° bringen können, dabei schwierig anzulegen sein und in vielen Fällen die Brikettgüte benachteiligen.

Um eine wirksame Kühlung durchzuführen, sind Kühlzeiten von ca. 2 Stunden ins Auge zu fassen.

IV. Der Einfluß der Schnellkühlung auf die Brikettqualität.

Daß die beschleunigte Kühlung auf die Festigkeit der Briketts günstig einwirkt, ist bereits mehrfach erwähnt worden. Gebhardt[63]) berichtet von einer Zunahme der Bruchfestigkeit bis zu 25 kg/cm² an den durch Beblasen und Berieseln gekühlten Briketts; nur an den durch einen Wassertrog von 4 oder 12 m Länge geführten Steinen konnte dies nicht festgestellt werden, da die erreichte Kühlung noch nicht ausreichend war. Die Untersuchungen von Fritzsche, auf die schon oben verwiesen worden ist, bestätigen, daß die Schnellkühlung auf die Biegungsfestigkeit eine verbessernde Wirkung ausübt. Jedoch ist die allgemeine Wasserbeständigkeit abhängig von der Zusammensetzung des Brikettiergutes, und man wäre darauf angewiesen, daß nur optimales Gut von einem der bestimmten Kohlenart eigenen Trocknungsgrad verpreßt wird. Dies würde sich nur bei ganz exakter Überwachung der Trocknung erzielen lassen.

Die zur Ermittlung des Wärmeüberganges unter verschiedenen Bedingungen gekühlten Briketts wurden im Anschluß an die Beobachtung des Temperaturverlaufes auf ihre Biegungsfestigkeit untersucht. Bei der Entnahme der Proben waren einige Briketts beiseite gelegt worden, die in ruhender Luft abkühlten und deren Festigkeitsprüfung zum Vergleich diente. Sämtliche Ermittelungen erfolgten nach vollständiger Abkühlung. Die Proben waren dicht am Pressenaustritt entnommen. Da sie nicht unter dem bei dem Transport in der Rinne einwirkenden Druck gestanden hatten, war ihre Festigkeit im allgemeinen etwas geringer, wie dies schon von Lamprecht gefunden wurde[64]). So wurde bei einem Versuch festgestellt, daß die an der Presse entnommenenen Briketts nach Abkühlung eine Biegungsfestigkeit von 12,2 kg/cm² hatten, während die benachbarten Steine, die erst nach Durchlaufen der über 100 m langen Kühlrinne genommen wurden, nach beendeter Abkühlung 13,6 kg/cm² aufwiesen. Die nachstehend angeführten Zahlen sind also hauptsächlich als Vergleichszahlen untereinander zu bewerten.

---

[63]) Niederschrift 8, a. a. O., S. 4.

[64]) Braunkohle 1927/28, S. 169.

a) und b) Die Festigkeiten der in ruhender oder leicht bewegter Luft gekühlten Briketts schwankten zwischen 12,2 und 16,6. Im folgenden ist, um den Einfluß der beschleunigten Kühlung zu erkennen, die Festigkeit der in ruhender Luft gekühlten Brikettproben zum Vergleich stets mit angegeben.

c) Die im natürlichen Luftzug benetzten Briketts ergaben

Biegungsfestigkeiten von	10,8	15,2	kg/cm²
Vergleichsprobe in ruhender Luft gekühlt	12,3	16,0	„
Abnahme an Festigkeit	1,5	0,8	„

Hier war also eine geringe Abnahme der Festigkeit der mit Wasser benetzten Briketts beobachtet worden. Auch waren in der Außenhaut einige Blasen entstanden.

d) Die im entlangstreichenden Ventilator-Wind gekühlten Proben ergaben

	18,2	17,1	kg/cm²
Vergleich in ruhender Luft	13,3	15,6	„
Zunahme an Festigkeit	4,9	1,5	„

Der Einfluß des trockenen Windstromes war also günstig. Veränderungen der Oberfläche wurden nicht bemerkt.

e) Auch die im anprallenden Luftstrom gekühlten Steine ergaben eine Zunahme der Festigkeit.

	16,8	14,5	kg/cm²
Vergleich in ruhender Luft	13,7	14,5	„
	3,1	0,0	„

f) Die im entlangstreichenden Luftstrom bei Benetzung oder Berieselung gekühlten Brikettwürfe zeigten

	13,8	17,2	19,8	19,8	kg/cm²
Vergleich in ruhender Luft	12,2	13,3	16,0	16,0	„
Zunahme der Festigkeit	1,6	3,9	3,8	3,8	„

Das Aussehen der Proben nach der Kühlung war fast einwandfrei. In zwei Fällen wurde geringe Blasenbildung bemerkt.

g) Die in der bespülten Schwalbung und im Blechmantel indirekt gekühlten Proben ergaben

	19,4	13,1	kg/cm²
Vergleich	16,6	12,2	„
Zunahme der Festigkeit	2,8	0,9	„

Außerdem war die Oberfläche der unter annäherndem Luftabschluß gekühlten Steine sehr günstig beeinflußt worden. Sie war von schöner tiefschwarzer Farbe und tadelloser Glätte. Diese Feststellung ist nicht neu. Die Kühlung der für Ausstellungszwecke oder als Probesteine bestimmten Briketts geschieht auf den Fabriken häufig unter Luftabschluß unter einer Decke von Sand oder Brikettgrus.

h) Die Wasserkühlung, wobei die Proben sich mehr als zwei Stunden im Wasser befanden, ergab ebenfalls eine Steigerung der Festigkeit.

Festigkeit.	12,5	17,6	12,5	17,6	17,7	kg/cm²
Vergleich	12,3	16,6	12,2	13,7	14,5	„
Zunahme	0,2	1,0	0,3	3,9	3,2	„

Das Aussehen war meist gut, nur in einem Fall traten starke Blasen auf.

i) Die nur zeitweilig, also je 15, 30 und 45 Minuten in Wasser eingetauchten Briketts ergaben eine Abnahme der Festigkeit.

	15,7	14,2	12,2	kg/cm²
Vergleich in ruhender Luft	16,5	16,5	16,5	„
Abnahme der Festigkeit	0,8	2,3	4,3	„

Es kann jedoch aus diesem einen Versuch ein allgemeiner Schluß noch nicht hergeleitet werden. Möglicherweise ist die Abnahme der Festigkeit darin begründet, daß die nach der Herausnahme aus dem Wasserbad vom Kern erfolgende Wiedererwärmung der Oberfläche die Festigkeit beeinträchtigte.

Die mitgeteilten Ergebnisse bestätigen also, daß durch die Schnellkühlung im allgemeinen eine Zunahme der Festigkeiten zu erwarten ist. An Hand der Abbildung 10 kann dies folgendermaßen erklärt werden: Dargestellt sind die Isothermen im Brikett zu einzelnen Zeitpunkten; in der oberen Hälfte bei Kühlung in ruhender, in der unteren Hälfte bei beschleunigter Kühlung. Bei $\alpha = 8$ hat selbst nach zweistündiger Dauer die Oberfläche und dicht angrenzende Zone immer noch eine Temperatur von 36 bis 40 ° inne. Die schon oben erwähnte Gefügelockerung infolge des Dunstdruckes des in der Brikettsubstanz enthaltenen Wassers kann sich hier längere Zeit, d. h. mehrere Stunden lang, auswirken. Bei gutem Wärmeübergang dagegen fällt, wie außerdem aus Abb. 5 zu entnehmen ist, die Temperatur der Oberfläche schon in $z = 0{,}05$ h $= 3$ Minuten von 65 auf 23 °, und auch die angrenzenden Zonen gleichen sich an. Bei den geringen Temperaturen aber tritt eine Gefügelockerung nicht mehr ein, da bei ca. 25 ° in der Brikettsubstanz keinerlei schädliche Nachverdampfung mehr zu erwarten ist. Das Brikett ist schnell durch eine gekühlte und gefestigte Zone umgürtet, die die günstige Wirkung hervorbringt.

Die in dem Brikett hervorgerufenen Temperaturunterschiede und etwaige von ihnen herrührende Wärmespannungen sind der Brikettgüte nicht schädlich. Sie treten bei gutem Wärmeübergang nach den oben gemachten Angaben am stärksten einige Minuten nach Beginn der Abkühlung ein. Eine Festigkeitsabnahme wurde jedoch an den diesen Temperaturspannungen unterworfenen Steinen nicht beobachtet.

Es war oben bei der Besprechung des Einflusses, den die Anfangstemperatur auf die Kühlung der Briketts ausübt, festgestellt worden, daß deren absolute Höhe die Temperatur bei der Verladung nicht überragend beeinflußt (S. 65). Die Differenz der Durchschnittstemperaturen verringert sich im Verlauf der Kühlung mehr und mehr. Betrug sie am Anfang 20°, indem einmal eine Anfangstemperatur von 75°, ein anderes Mal eine solche von 55° angenommen wurde, so hatten sich bei gutem Wärmeübergang ($\alpha = 70$) die Durchschnittstemperaturen nach einer einstündigen Kühldauer bis auf 5°, nach 2 Stunden bis auf 2° genähert. Es wurde also vorgeschlagen, soweit eine kalte Verladetemperatur das Ziel der Bemühungen ist, der Kühlung des fertigen Briketts mehr Aufmerksamkeit zu widmen, als der Kühlung der Brikettierkohle.

Demgegenüber ist jedoch bekannt, daß eine gut gekühlte Brikettierkohle festere Briketts ergibt. So hatten nach Lamprecht die Briketts einer mit 30° verpreßten Kohle Festigkeiten von ca. 13 kg/cm², während die Brikettierkohle von 50° nur ca. 11 kg/cm² ergab.[65]) Lamprecht betont jedoch gleichzeitig, daß das äußerliche Aussehen der mit kalter Kohle gepreßten Briketts, namentlich hinsichtlich der Glätte, nicht gut war. Ein allgemeiner Vorteil durch die um ca. 20° verbesserte Kühlung der Preßkohle war also nicht erzielt worden.

Wenn man die von Lamprecht in einer Kurve niedergelegten Ergebnisse erweitert, so könnte man schließen, daß eine geringer gekühlte Brikettierkohle, die beispielsweise mit 60° vor den Stempel gelangt, eine Festigkeitsabnahme um 0,5 kg/cm² gegenüber dem mit 50° verpreßten Brikett ergeben würde. Lamprecht erklärt dies mit der verringerten Reibung der heißen Kohle in der Form, wodurch der Gegendruck verkleinert wird. Man kann jedoch annehmen, daß durch eine Änderung des Buckels das frühere Verhältnis wiederhergestellt werden kann. Aber auch, wenn beim Verpressen wärmerer Kohle eine geringe Festigkeitsabnahme entstehen würde, so könnte nach den oben mitgeteilten Versuchsergebnissen diese durch eine künstliche Kühlung der fertigen Briketts mindestens ausgeglichen werden. Zu einer vollständigen Beurteilung des Ausmaßes reichen die ausgeführten Festigkeitsuntersuchungen noch nicht aus, und sie müßten durch zahlreiche Versuche an Brikettierkohle mit verschiedenem Wärmegrad ergänzt werden. Man kann jedoch aus ihnen bereits die Begründung zu einer Erweiterung der schon oben gemachten Vorschläge herleiten:

Bei dem Entwurf von Brikettfabriken sind die Kühleinrichtungen nur so groß zu bemessen, als es zur Durchmischung des Brikettiergutes und zum Ausgleiche des Trockengrades der einzelnen Korngrößen erforderlich ist. Daß die Steine mit einem höheren Wärmegrad aus der Presse

---

[65]) Braunkohle 1927/28, S. 169.

austreten, ist unbeachtlich, denn dieser würde durch eine an die Fabrikation angegliederte künstliche Kühlung der fertigen Briketts wirksam herabgemindert werden können, sodaß man unbedenklich verladen kann. Sollte durch Verpressen heißerer Brikettierkohle die Festigkeit gelitten haben, so würde diese durch die künstliche Kühlung wieder hergestellt und verbessert.

V. Vorschläge und Zusammenfassung.

Mit der Kühlung von Briketts befassen sich folgende Patentschriften:

a) Verlängerung der Kühldauer.

28 525, Werminghoff, vom 23. 10. 1883. Aus einer Anzahl untereinander und nebeneinander gelegter Rutschrinnen wird eine Batterie gebildet. Die Beschickung geschieht von einem schwenkbaren Rinnenstück, auf dem einzelne Brikettwürfe durch eine von Hand bediente Scherenzange ergriffen und beschleunigt abgeführt werden. Es kann also umgeschaltet werden, ohne vom nachrückenden Brikettstrang behelligt zu sein.

28 840, Schulz, vom 20. 3. 1884. Die Kühlrinne soll in neben- oder übereinander liegenden Spiralen von ca. 15 m Durchmesser herum geführt werden; dabei entsteht außerdem eine spitzwinklige Lüftung der Schlagflächen.

66 324, Schmidt, vom 10. 6. 1892. Ein mit einer schraubenförmig gewundenen Kühlrinne versehener und um eine senkrechte Achse drehbarer Kühler wird durch den Preßstrang gefüllt. Zur Entleerung wird der Eintritt des Preßstranges umgeschaltet, und die Drehrichtung des Kühlers umgekehrt.

210 426, Arnold, vom 24. 4. 1908. Die Briketts werden am Umfang eines drehbaren Tellers festgeklemmt, sodaß der Teller bei jedem Preßhub um eine Steinstärke gedreht wird. Es braucht also der Strang nicht in Krümmung zu drücken.

211 880, Töpfer, vom 26. 8. 1908. Es handelt sich um eine Schaltanlage an der Kühlrinnen-Batterie. Die Einlauf- und Auslaufschwenkrinne sind zwangläufig verbunden. Eine Ausbrechvorrichtung vor der Schwenkrinne erleichtert das Schalten.

253 295, Happe, vom 26. 4. 1912. Die Kühlrinnen sind am Umfang eines Vertikalkreises angeordnet, um die Lagenveränderung der Schwenkrinne zu verkürzen. Das Gestell, auf dem sie verlagert sind, kann auch drehbar um eine Horizontalachse verlagert sein, sodaß es, wenn die

nächste Rinne beschickt werden soll, um ein Teilstück gedreht wird, und die Einlauf- und Auslaufrinnen nicht umgeschaltet zu werden brauchen.

429 218, Wolter, vom 23. 4. 1925. Die Umschaltung der Schwenkrinne zur Bedienung der Kühlbatterie wird von einem an der Presse angebrachten Hubzähler selbsttätig ausgelöst.

b) Belüftung des Brikettstranges.

279 530, Schlauf, vom 11. 11. 1913. Der Brikettstrang wird ummantelt und Luft an ihm entlang gesaugt. Findet das Absaugen an einem Ende statt, so muß dort gleichzeitig eine Stopfbüchse zur Abdichtung vorgesehen werden. Daher wird empfohlen, in der Mitte des Kühlschrankes abzusaugen.

280 554, Grätz, vom 27. 1. 1914. Um die Schäden durch Berieseln oder Bebrausen zu vermeiden, sollen die (Steinkohlen-)Briketts lediglich belüftet werden. Sie werden auf ein Transportband überführt. Am Austrittsende des Kühlschrankes sind mehrere Düsen angebracht, durch die Luft in den Kühlschrank eingeblasen wird.

287 372, Grätz, vom 13. 5. 1914. Zusatz zu 280 554. Das Fördermittel ist luftdurchlässig ausgebildet, sodaß Luft auch zwischen den einzelnen Briketts hindurch streicht.

c) Kühlung durch Wasser.

6119, Baindride u. A., vom 23. 9. 1890. Die aus der Presse kommenden (Steinkohlen-)Briketts werden auf einem Transportband mit Querstegen durch ein Wasserbad geführt.

In die Praxis haben diese Patente nach der Kenntnis des Verfassers im allgemeinen wenig Eingang gefunden und sind wohl zumeist unbekannt geblieben.

Der in letzter Zeit von einem Werk in Mitteldeutschland bekanntgewordene Versuch, den Brikettstrang beim Passieren eines Wassertroges zu kühlen, ist bereits oben erwähnt und in seiner Auswirkung auf die Durchschnittstemperatur besprochen worden.

Weiter wurde von diesem Werk berichtet [66]), daß die Briketts während der Schüttung in den Waggon berieselt werden, wobei blasende Luftströme auf die Schüttkegel gerichtet sind. Eine genaue rechnerische Erfassung des Vorganges ist nicht möglich, da die Zeit, die der einzelne Stein dem Luftwirbel ausgesetzt ist, nicht bekannt ist. Die Berechnung weicht außerdem insofern von dem bisher eingeschlagenen Gang ab, als

[66]) Niederschrift 8, a. a. O., S. 4. Braunkohle 1928/29, S. 565.

hier nicht nur die glatten Flächen, sondern auch die Schlagflächen des Briketts für den Wärmeaustausch zur Verfügung stehen. Auf Seite 31 wurde vorgeschlagen, in diesem Fall für den Verlauf der Durchschnittstemperatur des Brikettprismas den eines Brikettzylinders von 6 cm Durchmesser zum Anhalt zu nehmen. Die WÜZ kann bei Beblasen und Berieseln hier zu $\alpha = 35$ eingesetzt werden. Die t_d-Kurve des Zylinders würde bei $\alpha = 35$ während der Abkühlung eine ungefähre Neigung von 12 ° in 15 Minuten haben. Würde also ein Brikett, bevor es überdeckt wird, 3 Minuten lang von dem Luftwirbel eingehüllt, so könnte dabei die Durchschnittstemperatur des Steines um 2 bis 3 Grad gesenkt werden. Da aber nicht alle Flächen des Briketts von dem Wind getroffen werden, so stehen sie auch nicht sämtlich unter dem günstigen Wärmeübergang. Jedoch wird ein zusätzlicher Vorteil dieses Verfahrens darin bestehen, daß bei geschütteten Ladungen der künstliche Wind einige Dezimeter tief in den Brikketthaufen eindringt und die Briketts während der Verladezeit mit einer niedrigeren Temperatur umgeben sind, als sie dies ohne die Beblasung gewesen wären. So kann geschätzt werden, daß Schüttladungen hierdurch mit ca. 5 ° geringerer Gesamttemperatur abgefertigt werden, was unter Umständen dem am Orte vorliegenden Bedürfnis entspricht.

Auf einem größeren Werk in Mitteldeutschland hat man, da die Entfernung zwischen Pressenhaus und Verladerampe zu kurz ist und auch die Kühlung in den Kühlbatterien in ruhender Luft nicht genügte, die im Rechteck angeordneten 12 Kühlrinnen ummantelt, und es wird durch einen in der Mitte über dem Kühlschrank aufgestellten Ventilator Luft aus dem Kühlschrank abgesaugt. Man vermeidet durch diese Anordnung des Ventilators, daß der Ein- und Austritt der Kühlrinne in den Kühlschrank abgedichtet werden muß; die angesaugte Luft strömt von beiden Enden des Kühlschrankes nach der Mitte. Um den Kühlwind zu zwingen, die Briketts zu berühren, sind an den Wänden des Kühlschrankes querstehende Prallbleche angebracht. Zweifellos wird durch diese Anlage eine wesentliche Verbesserung der Abkühlung erzielt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war, wie in der Einleitung bemerkt, eine Untersuchung, ob eine vollständige Abkühlung des Brikettstranges bis auf wenige Grad über die Außentemperatur vor der Verladung möglich ist, und mit welchen Mitteln sie erreicht werden kann. Festgestellt ist bisher, daß dazu eine Kühldauer von ca. 2 Stunden erforderlich ist, und daß die Länge des 12 Kühlrinnen vereinigenden Kühlschrankes 40 bis 60 m betragen muß. Eine Kühlung unter Zuhilfenahme von Wasser soll wegen der möglicherweise eintretenden äußerlichen Qualitätsverschlechterung nicht vorgeschlagen werden; sie würde auch keine wesentliche Verbesserung mehr bedeuten, wenn es gelingt, mit anderen Mitteln einen Wärmeübergang von $\alpha = 50$ bis 70 zu

erreichen. Dies ist nach den ausgeführten Untersuchungen mit starken, gegen die Brikettflächen gerichteten und sie in einen Wirbel einhüllenden Luftströmen zu erwarten.

Es wird daher empfohlen, in einem solchen Kühlschrank Einrichtungen vorzusehen, die starke Wirbel des Kühlwindes hervorrufen, sodaß eine unmittelbare Einwirkung auf die Oberfläche der Brikettstränge gewährleistet ist. Dies könnte dadurch erzielt werden, daß innerhalb des Kühlschrankes nach Art einer Förderschnecke gewundene Leitbleche angebracht werden, die den Wind in eine schraubenförmige Bewegung versetzen, sodaß er immer wieder gezwungen wird, zwischen die Profileisen der Kühlrinnen einzudringen. In Abb. 36 ist ein solcher Kühlschrank im Längsschnitt schematisch entworfen. Die Leitbleche sind mit 3 bezeichnet. Eine blasende Bewetterung ist besser als saugende, da der Wärmeübergang mit der Luftdichte an Intensität zunimmt. Daher ist der den Kühlschrank mit frischer Luft versorgende, am Boden angeordnete Ventilator 4

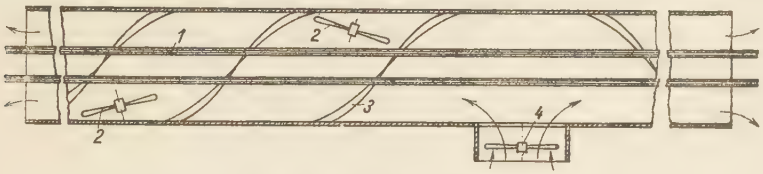

Abb. 36. Kühlschrank.

blasend wirkend gedacht. Um die sich nach beiden Seiten verteilenden Windströme, nachdem sie mehrfach an den Brikettsträngen 1 angeprallt sind, zu neuer Geschwindigkeit anzutreiben, sollen innerhalb des Kühlschrankes in gewissen Abständen Zusatzventilatoren 2 angebracht sein. Der Hauptventilator 4 braucht auch nicht kräftiger zu sein als die Zusatzventilatoren. Es kommt weniger auf das Luftquantum an, als auf die Wirbelbewegung.

Eine andere Möglichkeit zu starker Belüftung würde die Anordnung der Kühlrinnen am Umfang eines Vertikalkreises bieten, wie sie von Happe im Jahre 1912 in der auf Seite 94 erwähnten Patentschrift vorgeschlagen worden ist. Das Patent ist vom Inhaber nur 1 Jahr aufrechterhalten worden, da dieser Vorschlag gegenüber dem sonst üblichen rechteckigen Querschnitt der Kühlbatterie wohl keine Vorteile gebracht hat, soweit nur das Bedürfnis vorlag, die reine Kühldauer zu verlängern. Die kreisförmige Anordnung der Kühlrinnen würde jedoch den Einbau eines in der Mitte rotierenden Belüfters gestatten, wie auf Abbildung 37 dargestellt. Die Brikettstränge sind wiederum mit 1 bezeichnet, die schraubenförmig fortlaufenden Leitbleche am inneren Umfang des Kühlmantels mit 3. Die Belüftung wird durch den Umlauf der mit der Welle 2 verbundenen Windplatten 4 erzeugt. Die Welle 2 erstreckt sich durch die ganze Länge des Kühlschrankes; sie ist in gewissen Abständen in Lagern 5

gestützt. Die Windplatten 4 sind etwas schräg gestellt, um den verbrauchten Wind allmählich aus dem Kühlschrank herauszudrücken.

Der Kühlwind würde, ähnlich wie auf Abbildung 36 dargestellt, in der Mitte des Kühlschrankes eintreten und sich von dort nach beiden Sei-

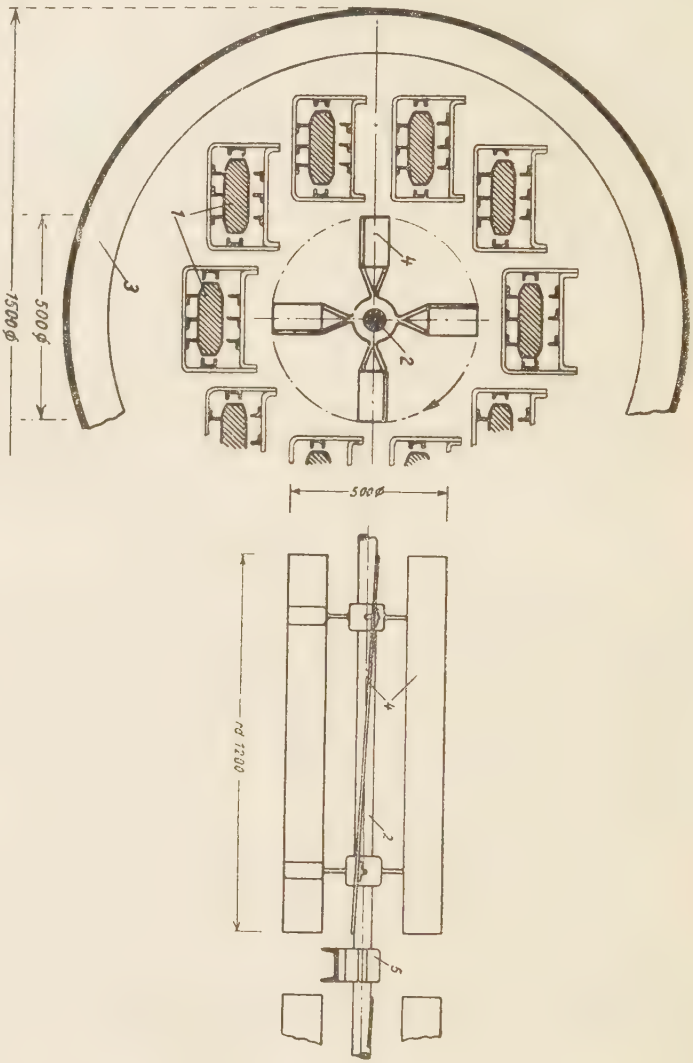

Abb. 37. Kühlschrank mit kreisförmiger Anordnung der Kühlrinnen bei Belüftung durch umlaufende Windplatten.

ten verteilen. Ein besonderer Ventilator an dieser Stelle erscheint jedoch nun infolge der Saugwirkung der schräg gestellten umlaufenden Windplatten nicht mehr nötig. Auch kann der Antrieb in der Mitte des Kühlschrankes geschehen, um die lange Welle zu entlasten.

Auf Abbildung 37 ist ein Rotationskreis der Windplatten von 500 mm Durchmesser in Aussicht genommen. Er würde die Anordnung von 10 Rin-

nen an seinem Umfang gestatten. Bei größerer Ausgestaltung könnte man entweder mehr Brikettstränge unterbringen, oder man würde die in der Horizontalebene der Welle liegenden Rinnen an einer Seite fortlassen, um den Zugang zu den Lagern der Welle und zu ihrem Antrieb zu ermöglichen.

Bei den mit kleinen Zimmerventilatoren erzeugten, gegen den Brikettstrang gerichteten Windströmen ist durch Versuche ein Wärmeübergang $\alpha =$ ca. 35 nachgewiesen. Dieser erzeugt nach 2-stündiger Einwirkung eine Herabminderung der Durchschnittstemperatur von 65 ° auf 26 °. Es ist jedoch anzunehmen, daß bei der vorgeschlagenen Anordnung mit größeren Ventilatoren Wärmeübergangszahlen $\alpha = 50$ bis 70 erreicht werden. Damit ist, wie aus Abbildung 31 und Seite 79 hervorgeht, nach 2-stündiger Kühlung eine Annäherung der Durchschnittstemperatur bis auf etwa 3 ° an die Temperatur der Umgebung zu erwarten. Bei einer höheren Umgebungstemperatur ist diese Angleichung etwas enger als bei einer niedrigeren, wie aus Abbildung 24 ersichtlich war.

Zusammenfassung.

Es werden die Gesetze der abklingenden Temperaturverteilung auf die Abkühlung des Brikettstrangs von 7″ Salonbriketts angewendet.

Der Einfluß des Raumgewichts, der Briketthöhe, der spezifischen Wärme, der Wärmeleitfähigkeit, der Temperatur zu Beginn der Abkühlung, der Umgebungstemperatur und des Wärmeübergangs auf die Abkühlgeschwindigkeit wird einzeln untersucht. Dabei wird die Wärmeleitzahl einer Niederlausitzer Brikettsorte zu $\lambda = 0{,}23$ bis $0{,}24$ ermittelt. Über die Randerwärmung beim Preßvorgang wird festgestellt, daß bei Abkühlung in ruhender Luft etwa 7 Minuten Kühldauer nach Austritt aus der Presse bis zur Herstellung einer annähernd gleichmäßigen Temperatur erforderlich sind. Die Wärmeübergangszahlen für Abkühlung in ruhender Luft, in künstlicher Belüftung und Berieselung und im Wasser werden untersucht.

Bei gutem Wärmeübergang ist es möglich, die Durchschnittstemperatur der im Kühlschrank von 40 bis 60 m Länge gelagerten Briketts in einer Kühldauer von 2 Stunden bis auf etwa 3 ° über die Umgebungstemperatur abzukühlen. Eine gesetzte Verladung bei diesem Wärmegrad wird, auch wenn Kühlschächte im Waggon nicht vorgesehen werden und eine weitere Kühlung im Waggon nicht stattfindet, als ungefährlich in Bezug auf Brikettqualität und Selbstentzündung angesehen, da sie heute bereits bei Versand des Sommerstapels in dieser Weise geschieht.

Da die Kühlung von Briketts bei direkter Berührung mit Wasser technisch und hinsichtlich der Brikettqualität nicht allgemein durchführbar erscheint, wird untersucht und nachgewiesen, daß bei Kühlung der Brikettstränge durch blasende und wirbelnde starke Luftströme nahezu derselbe Kühleffekt erreicht werden kann wie bei Kühlung im Wasser. Denn der zuerst große Einfluß von Verbesserungen des Wärmeüberganges auf die Abkühlung des Brikettstranges ist mit $\alpha = 50$ ziemlich erschöpft.

Gegenüber dem starken Einfluß, der sich durch künstliche Verbesserung des Wärmeüberganges auf die Abkühlung des Brikettstranges ausüben läßt, ist die Temperatur, mit der das Brikett aus der Presse austritt, von untergeordneter Bedeutung. Es ist wirtschaftlicher, eine kalte Verladetemperatur durch Verbesserung des Wärmeüberganges am Brikettstrang zu erstreben, als durch Vorkühlung der Brikettierkohle im Kühlhaus.

Jegliche Beschleunigung der Kühlung begünstigt die Festigkeit und die Güte des Briketts.

Zusammenstellung der Bezugszeichen.

t_a Temperatur des Körpers über 0 ° zu Beginn der Abkühlung.

t_b Temperatur der Umgebung über 0 °, zugleich Endtemperatur des abgekühlten Körpers.

$T_c = t_a - t_b$; Überschußtemperatur des Körpers über die Temperatur der Umgebung bei Beginn der Abkühlung.

t_m Temperatur im Mittelpunkt des Körpers über 0 °.

$T_m = t_m - t_b$; Überschußtemperatur im Mittelpunkt des Körpers 0 °.

t_o Temperatur der Oberfläche des Körpers über 0 °.

$T_o = t_o - t_b$; Überschußtemperatur der Oberfläche des Körpers.

t_d Durchschnittstemperatur des Körpers über 0 °.

$T_d = t_d - t_b$; Durchschnittstemperatur des Körpers über die Temperatur der Umgebung.

W_c (kcal) Wärmeinhalt des Körpers im Überschuß über Umgebungstemperatur t_b = Wärmeüberschuß zu Beginn der Abkühlung; $W_c = Q + W$.

W (kcal) Wärmeüberschuß zu einem Zeitwert z während der Abkühlung.

Q (kcal) Wärmeverlust zu einem Zeitwert z gegenüber dem zu Beginn der Abkühlung vorhandenen Wärmeüberschuß.

G (kg) Gewicht des Körpers.

V (cbm) Rauminhalt des Körpers.

B Breite des Salonbriketts (ca. 180 mm).

B_p Breite des flachen Teiles des Salonbriketts (ca. 120 mm).

$2H$ Höhe des Salonbriketts (ca. 60 mm), zugleich Durchmesser des Halbzylinders am Salonbrikett (ca. 60 mm).

S Stärke eines Briketts (ca. 40—55 mm).

α (kcal/m² · h · °C) Wärmeübergangszahl.

k (kcal/m² · h · °C) Wärmedurchgangszahl.

c (kcal/kg · °C) spezifische Wärme.

λ (kcal/m · h · °C) Wärmeleitzahl.

γ (kg/m³) Raumgewicht.

z (h) Zeit in Stunden.

t_p (°C) Temperatur der Brikettierkohle beim Eintritt in den Preßkopf, von 0 ° C an gerechnet.

T_k (°C) die dem gesamten Brikettquerschnitt durch die Pressung zugeführte Temperaturerhöhung.

T_r (°C) die den Randzonen zugeführte zusätzliche Temperaturerhöhung, soweit sie beim Austritt aus der Presse noch vorhanden ist, auf den gesamten Brikettquerschnitt umgerechnet.

α_s (kcal/m² · h · °C) Strahlungsanteil der Wärmeübergangszahl.

α_l (kcal/m² · h · °C) der auf Wärmeleitung und Konvektion entfallende Anteil der Wärmeübergangszahl.

C_1 (kcal/m² · h · (°C)⁴) Strahlungszahl des strahlenden Körpers (Brikett = 4,0).

C_2 (kcal/m² · h · (°C)⁴) Strahlungszahl des bestrahlten und reflektierenden Körpers.

C_s (kcal/m² · h · (°C)⁴) Strahlungszahl für absolut schwarze Strahlung, $C_s = 4{,}9$.

T_1 die absolute Temperatur des strahlenden Körpers $T_1 = t_o + 273\,°$.

T_2 die absolute Temperatur des strahlenden Körpers $T_2 = t_b + 273\,°$.

C (kcal/m² · h · (°C)⁴) Strahlungsfaktor.

a (°C)³ Temperaturfaktor.

Versuch IIa.

Bestimmung der spezifischen Wärme.

1. Wägungen beim Einlegen in den Wärmeschrank und während des Erwärmens.

	Probe I	Probe II	Vergleichs-Probe III
	g	g	g
1. Am 30. 6. 15h	301,90	311,70	295,16
2. 1. 7. 10	276,08	284,70	269,43
3. 18	270,23	278,92	263,78
4. 2. 7. 7	268,61	277,22	262,15
5. 12	eingelegt	eingelegt	261,64

	g	%	g	%	g	%
1ter Gewichtsverlust	25,82	8,57	27,00	8,86	25,73	8,71
2 „ „ „	5,85	2,11	5,87	2,03	5,63	2,10
3 „ „ „	1,62	0,60	1,70	0,61	1,63	0,63
4 „ „ „					0,51	0,1944

Es wird angenommen, daß Proben I und II ebenfalls einen 4ten Gewichtsverlust von 0,1944 % hatten. Er beträgt

	Probe I	Probe II
4ter Gewichtsverlust	0,53 g	0,54 g
Also 5tes Gewicht der Proben	268,08	276,68
Ab Rückwägungen, Papierschale und Körnchen . . .	18,43	12,38
Eingelegtes Gewicht	249,65	264,30
Zusammen Probe I und Probe II	G = 513,95 g.	

2. Die Innentemperatur des Wärmeschrankes betrug $t = 85\,^{\circ}$.

3. Abfließende Wassermenge

Zeit	ccm	Zeit	ccm	Zeit	ccm	Zeit	ccm
12,00 h	0	13,10 h	172	14,10 h	199	15,20 h	214,0
05	50	20	177	2,20	203,5	40	215,9
11	100	30	182	30	206,0	16,00	217,2
37	150	40	187	40	208,5	20	217,3
50	160	50	191	50	210,3		
13,00	166	14,00	195	15,00	212,0		

4. Korrektur der Schmelzwassermenge durch Feuchtigkeitsaufnahme der Proben im Kalorimeter.

Rückwägung der Proben nach der Kühlung	516,50 g
Gewicht beim Einlegen	G = 513,95 g
Wasseraufnahme	2,65 g

Schmelzwassermenge, gemessen	217,3 ccm
Plus Wasseraufnahme	2,65 „
Schmelzwassermenge tatsächlich	A = 219,95 „

5. Kontrolle durch Wassergehaltsanalysen.

Wassergehalt der Probe III	4,0 %
Wassergehalt der in Eis gekühlten Brikettstücke	4,5 %
Zunahme der Feuchtigkeit um	0,5 %

Die durch Wägung der Kohlen festgestellte Gewichtszunahme betrug $\frac{2{,}65 \cdot 100}{516{,}50} = 0{,}51\ \%$

6. Berechnung von c und c_0.

$$c = \frac{A}{G \cdot t} \cdot 80{,}1 = \frac{219{,}95 \cdot 80{,}1}{513{,}95 \cdot 85} = 0{,}404$$

Nach Berücksichtigung des durch Analyse festgestellten Wassergehaltes von 4 % der eingelegten Proben ist

$$c = 0{,}96 \cdot c_0 + 0{,}04 = 0{,}404,$$

$$c_0 = \frac{0{,}404 - 0{,}04}{0{,}96} = 0{,}379.$$

Die spezifische Wärme der wasserfreien Brikettsubstanz betrug $c_0 = 0{,}379$.

Versuch IVa.

Bestimmung der Durchschnittstemperatur von Briketts beim Austritt aus der Presse.

9^h 2 Steine entnommen, eingewickelt, zerschlagen in je 4 bis 5 Stück. $9{,}02^h$ in das Eiskalorimeter eingelegt.

1. Ermittlung des Gewichtes G der eingelegten Stücke.
   Gewicht nach Abkühlung $G_1 = 967{,}19$ g.
   Wassergehalt der eisgekühlten Stücke 14,4 %.
   Wassergehalt der Nachbarbriketts des Stranges 14,3 %.

$$G = G_1 \cdot \frac{1 - 0{,}144}{1 - 0{,}143} = 967{,}19 \cdot \frac{0{,}856}{0{,}857} = 966{,}06 \text{ g.}$$

2. Schmelzwassermenge gemessen $A_1 =$ 383,00 ccm
   Dazu Feuchtigkeitsaufnahme der Proben $G - G_1 = +$ 1,13 „
   Schmelzwassermenge korrigiert $A =$ 384,13 ccm.

3. Spezifische Wärme c_o der wasserfreien Substanz an den Nachbarbriketts ermittelt (Versuch IIa)

$$c_o = 0{,}379.$$

   Demnach spezifische Wärme c der Proben

$$c = 0{,}379 \cdot 0{,}857 + 0{,}143 = 0{,}458.$$

4. Anfangstemperatur

$$\frac{a}{c \cdot G} \cdot 80{,}1 = \frac{384{,}13}{0{,}458 \cdot 966{,}06} \cdot 80{,}1 = 69{,}6°.$$

1	2	3	4	5	6	7	8
Lfde. Nr.	Versuchs-Nr.	Versuchsanordnung	Zu Gruppe	t_a	t_b	T_c	H
1	VIa	Ruhende Luft	a	69,0	23,5	45,5	0,031
2	b	Leicht bewegte Luft (Fenster) benetzt	c	„	19,5	49,5	„
3	c	Wasser	h	„	20,0	49,0	„
4	VIIa	Ruhende Luft	a	65,0	23,0	42,0	0,0305
5	b	Leicht bewegte Luft (Fenster)	b	„	„	„	„
6	c	Kühlmantel (Schwalbung)	g	„	19,0	46,0	„
7	d	Wasser	h	„	„	„	„
8	VIIIa	Kühlmantel (Blech)	g	68,0	19,0	49,0	0,03
9	b	Ventilator 5,3 m/sec bebraust	f	„	„	„	„
10	c	Wasser	h	„	„	„	„
11	IXa	Ruhende Luft	a	66,5	25,0	41,5	0,03
12	b	Offenes Fenster quer hängend	b	„	„	„	„
13	c	Desgl. benetzt	c	„	22,0	44,5	„
14	Xa	Ventilator 3,6 m/sec entlang streichend	d	68,0	19,0	49,0	0,03
15	b	Desgl. 3,9 m/sec benetzt	f	68,0	14,0	54,0	0,03
16	XIa	Im Freien bei Windstille	b	67,0	25,0	42,0	0,03
17	b	Ventilator 3,6 m/sec bebraust	f	67,0	19,5	47,5	0,03
18	c	Desgleichen	f	„	„	„	„
19	XII	Ventilator 6,3 m/sec	d	68,5	27,5	41,0	0,03
20	XIIIa	Ruhende Luft in Brikettrinne	a	69,0	28,0	41,0	0,03
21	b	Ventilator 4 m/sec gegen Breitseite	e	„	„	„	„
22	c	Wasser	h	„	22,0	47,0	„
23	XIVa	Ruhende Luft	a	68,5	23,5	45,0	0,03
24	b	Ventilator 4 m/sec gegen Breitseite	e	„	27,0	41,5	„
25	c	Wasser	h	„	23,5	45,0	„
26	XVa	15 Min Wasser	i	69,0	20,0		0,031
27	b	30 Min Wasser	i	„	23,5		
28	c	45 Min Wasser	i	—	—		

VI bis XV.

9	10	11	12	13	14	15	16
N	z bei N = 0,5	t_m	T_m	$\frac{T_m}{T_c}$	M	α	kg/cm²
0,446 . z	1,12	57,9	34,4	0,755	1,23	9,1	12,3
		50	30,5	0,616	2,85	21,2	10,8
						ca. 600	12,5
0,461 . z	1,084	54,8	31,8	0,757	1,23	9,27	16,6
		52,0	29,0	0,690	1,85	12,1	16,6
		42,8	23,8	0,517	5,8	41,7	19,4
						ca. 600	17,6
0,476 . z	1,05	47,0	28,0	0,571	3,7	28,4	13,1
		42,2	23,2	0,473	8,6	66	13,8
						ca. 600	12,5
0,476 . z	1,05	56,0	31,0	0,747	1,3	0,96	16,0
		53,0	28,0	0,675	2,02	15,5	14,3
		49,3	27,3	0,614	2,85	21,85	15,2
0,476 . z	1,05	49,0	30,0	0,613	2,00	22,2	18,2
0,476 . z	1,05	44,7	30,7	0,569	3,90	28,9	17,2
0,476 . z	1,05	57,0	32,0	0,761	1,175	9,0	16,0
		45,5	26,0	0,547	4,58	35,1	19,8
0,476 . z	1,05	45,0	25,5	0,537	4,92	37,7	
0,476 . z	1,05	51,0	28,5	0,573	3,70	28,4	17,1
0,476 . z	1,05	59,5	31,5	0,768	1,15	8,8	13,7
		50,5	22,5	0,550	4,5	34,6	16,8
						ca. 600	17,6
0,476 . z	1,05	58,0	34,5	0,766	1,16	8,9	14,5
		49,5	22,5	0,541	4,7	36,0	14,5
						ca. 600	17,7
0,446 . z							15,7
							14,2
							12,2

Versuch V.

Messungen in einem 1-cbm-Stapel zur Ermittlung der Anfangstemperatur.

Presse 11 mit 132 Umdr./min.
Temperatur der Preßkohle 50 °.
14,45 h Ausbrechen des Stranges.
14,58 h Stapel aufgestellt.

Uhrzeit	Zeit	Thermometer-Ablesungen		
		I Links 30 cm vom Rand	II Mitte	III Rechts 30 cm vom Rand
15,05	7 Min.	68	68	65
15,30	32	69	69	64
15,45	47	69	69,5	65
16,30	1 St. 30 Min.	68	69	64
17,50	2 50	68	69	63
20,30	5 30	68	69	60
8,30	17	66	66	52
14,15	23	64	65	50
17,30	26	63	64	47
21,30	30	60	62	45
14,30	40	55	59	35

Lebenslauf.

Am 23. April 1893 wurde ich zu Greiz in Thüringen geboren. Mein Vater ist der städtische Baudirektor i. R. Curt Schuster in Freiberg in Sachsen.

Nach Besuch des Realgymnasiums bezog ich 1912 die Bergakademie zu Freiberg i. Sa. Das Studium wurde durch 4jährigen Kriegsdienst unterbrochen. Im Jahre 1920 bestand ich die Diplomprüfungen als Bergingenieur und Markscheider.

Zunächst war ich 3 Jahre Assistent bei der Braunkohlengesellschaft Gustav Hasse bei Weißenfels a. d. Saale, dann 1 Jahr Leiter der technischen Abteilung an der Hauptverwaltung der Braunkohlen- und Brikett-Industrie-A.G. Bubiag in Berlin. Das Jahr 1924 verbrachte ich in den Vereinigten Staaten von Nordamerika, wo ich zunächst praktisch an Kohlenstaubfeuerungen tätig war, anschließend eine Konstrukteurstelle in der Kohlenstaubabteilung der International-Combustion-Engineering-Corporation innehatte und eine Studienreise durch amerikanische Industrie- und Bergbaugebiete ausführte. Einem Angebot der Braunkohlen- und Brikett-Industrie-A.G. Bubiag folgend, übernahm ich Anfang 1925 die Betriebsdirektion des Konzernwerkes Vereinigte Schwiebuser Kohlenwerke, die Ende 1927 infolge der wirtschaftlichen und bergmännischen Schwierigkeiten des ostdeutschen Braunkohlentiefbaus zur Stillegung kamen. Ich nahm darauf eine Anstellung in der Prüfungsstelle Bergbau beim Reichspatentamt an.

Druck von Ernst Mauckisch, Freiberg i. Sa.